

Aus dem Institut für Umweltingenieurwesen
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den
Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensilierungsmittels**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

vorgelegt von **Dipl.-Ing. Dirk Banemann**
wohnhaft in Wahlstedt

Gutachter:
Prof. Dr. Michael Nelles
Prof. Dr. Klaus Fricke
Dr. Johannes Thaysen

Tag der Einreichung: 14.04.2010
Tag der Verteidigung: 1.7.2010

Ich möchte Allen, die maßgeblich am Gelingen dieser Arbeit beteiligt waren, ganz herzlich danken:

- Herrn Prof. Dr. Michael Nelles für die Unterstützung und die gewährten Freiräume;
- Herrn Prof. Dr. Klaus Fricke für die Begutachtung;
- Herrn Dr. Johannes Thaysen für die immer konstruktive und kritische Begleitung der Arbeit als Co-Referent;
- Frau Prof. Dr. Zeyner als Vorsitzende des Prüfungsausschusses;
- meinen Kollegen am Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock - Nils Engler, Andrea Schüch, Abdallah Nassour, Gert Morschek, Steffen Licht, Majanny Abdulkader, Sören Weinrich, Christine Herz, Gisela Beckmann und Kersten Eckermann;
- den Geschäftsführern Herrn Dr. Edmund Mathies und Herrn Dietmar Ramhold sowie allen Angestellten der ISF GmbH für die Diskussionsbereitschaft und die tatkräftige Unterstützung im Labor;
- den Studenten Jörn-Jakob Piening, Julia Gerstenberg, Jens Herold, Martina Aschemann, Friedjof Tietjen, Maria Spittel;
- meiner Lebensgefährtin Ilka Bührmann und ihrer Familie für die Unterstützung;
- meiner Familie für den Rückhalt;

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen	4
2.1	Biologische Grundlagen der Silierung	4
2.1.1	Siliereignung	5
2.1.2	Epiphytische Flora	7
2.1.3	Silierverluste	9
2.1.4	Silageabwasserfraktion.....	13
2.1.5	Silierzusätze.....	14
2.1.6	Biologische Silierzusätze	17
2.1.6.1	Milchsäurebakterien	17
2.1.6.2	Propionibakterien	22
2.1.7	Aerober Verderb	22
2.1.8	Verdichtung.....	23
2.1.9	Temperaturentwicklung	25
2.1.10	Mikroorganismen	28
2.1.10.1	Hefen.....	28
2.1.10.2	Pilze.....	32
2.1.10.3	Acetobacter	33
2.1.11	Zusammenfassung Silierung	34
2.2	Prozessschritte der Biogasgestehung	35
2.2.1	Biologie der Biogasgestehung	35
2.2.2	Verfahrensschritte landwirtschaftlicher Biogasanlagen	43
2.2.2.1	Verfahrenskonzepte und Betriebsweisen	43
2.2.2.2	Substratlogistik	44
2.2.2.3	Einbringtechnik.....	45
2.2.2.4	Biogasgestehung aus nachwachsenden Rohstoffen	46
2.2.3	Zusammenfassung Biogasgestehung	49
3	Material und Methoden.....	51
3.1	Silierung & Lagerung	52
3.2	Lagerung unter Luftsauerstoffeinfluss	55
3.3	Bestimmung Methanertrag.....	55
3.4	Bilanzrahmen „Silierung – aerobe Stabilität – Gasertrag“	56
3.4.1	Silierverluste	58
3.4.2	Verluste durch aerobe Lagerung	59
3.5	Silagegärprodukte in der Biogasgestehung	60

4	Ergebnisse	62
4.1	Bilanzierungssilagen	62
4.1.1	Gärgas-Verluste.....	63
4.1.2	Mikrobieller Status im Laufe der Silierung	64
4.1.3	Gärsäuremuster	66
4.2	Einfluss der aeroben Lagerung	69
4.2.1	Temperaturverlauf.....	69
4.2.2	Chemische und stoffliche Veränderungen.....	74
4.2.2.1	Änderungen des Gärsäuremusters	74
4.2.2.2	Stoffliche Veränderungen.....	79
4.2.3	Gewichtsbilanz.....	80
4.2.4	Bilanz-Ergebnisse	81
4.2.5	Ermittlung der Methanverluste pro Stunde Erwärmung.....	84
4.3	Wirkung verschiedener Kohlenstoffquellen in der Biogasgestehung	85
5	Diskussion	88
5.1	Versuchskonzept	88
5.2	Beurteilung des Ausgangsmaterials.....	89
5.3	Silierung und Silierverluste.....	89
5.4	Effekte des MSB_{hohe}-Siliermittels auf die Gärqualität, aerobe Stabilität und stoffliche Veränderungen unter aerober Lagerung	91
5.4.1	Effekte auf die Gärqualität	91
5.4.2	Verlauf der Gärsäurebildung.....	92
5.4.3	Effekte auf die aerobe Stabilität und Trockenmasseverluste	93
5.4.4	Stoffliche Veränderungen durch Luftexposition.....	95
5.5	Gasertrag zu unterschiedlichen Bilanzzeitpunkten.....	99
5.5.1	Bilanzzeitpunkt II (ohne aerobe Exposition)	99
5.5.2	Bilanzzeitpunkt III (mit aerober Exposition)	99
5.6	Verhalten verschiedener Silage-Gärprodukte im Biogasprozess.....	101
5.6.1	Batch-Versuch	101
5.6.2	Fed-Batch-Versuch I	101
5.6.3	Fed-Batch-Versuch II	101
5.7	Ausblick	102

6	Schlussfolgerungen und Thesen	104
7	Literatur	106
8	Abbildungsverzeichnis	123
9	Tabellenverzeichnis.....	125
10	Anhang.....	I

Abkürzungen und Formelzeichen

ADF	Acid-Detergent-Fibre, Säure-lösliche Fasern
ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosintriphosphat
a_w	Wasseraktivität
BSB	biologischer Sauerstoffbedarf
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FM	Frischmasse
g	Gramm
GV	Gärgasverluste
KbE	Kolonienbildende Einheit
KTBL	Kuratorium für Technik und Bau in der Landwirtschaft
KULAP	Kulturlandschaftsprogramm
kWh	Kilowattstunde
LWK	Landwirtschaftskammer
MD	Massendifferenz
MSB	Milchsäurebakterien
NAD	Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid
NADH	reduzierte Form des Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid
NDF	Neutral-Detergent-Fibre, Neutral-lösliche Fasern
NEL	Netto-Energie-Laktation
PK	Pufferkapazität
pH	Pondus Hydrogenii
s	Sekunde
Std	Stunde
VK	Vergärbarkeitskoeffizient
WLK	Wasserlösliche Kohlenhydrate
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XP	Rohprotein
XZ	Rohzucker
XS	Stärke
Z	Zucker
μ_{max}	Wachstumsrate
K_m	halbmaximale Wachstumsrate

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Vergärung von organischem Material ist ein in der Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik anerkannter Weg der Abfallbehandlung (NELLES, 2003). Primäres Ziel der anaeroben Abfallbehandlung ist die Reduktion der organischen Substanz sowie die Einhaltung ablagerungstechnischer Grenzwerte (FRICKE, 2000). Sekundäres Ziel stellt die Energieerzeugung dar (DICHTL, 2005). Die Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen verfolgt dagegen das primäre Ziel der maximalen Energieausbeute des zugeführten Substrates bzw. die Minimierung der hierfür benötigten Ackerfläche.

Die Erhöhung der Flächenproduktivität als grundlegender wirtschaftlicher Erfolgsfaktor gewinnt bei steigendem Ausbau der biogenen Energieträger und durch die Konkurrenz der verschiedenen Nutzungswege um die angebaute Biomasse an Bedeutung. Neben der Steigerung des Biomasseertrages, ausgedrückt in Trockenmasse pro Flächeneinheit, kommt der verlustarmen Bereitstellung des Substrates bis in den Fermenter eine herausragende Rolle zu. Die Optimierung der Substratbereitstellung ist ein wesentlicher Hebel zur Steigerung der Effizienz von Biogasanlagen, da die Substratkosten meistens 50% der gesamten Betriebskosten ausmachen (ECOLOGIC, 2008), (ODENING, 2007). DEDERER (2008) nennt auf Basis der Substratpreise von 2008 Bereitstellungskosten für Substrate zwischen 6,17 und 11,86 Cent pro Kilowattstunde.

Wesentliche Substratquelle landwirtschaftlicher Biogasanlagen sind speziell für diesen Zweck angelegte Silagen (DBFZ, 2009). Die Silierung des Erntematerials dient der ganzjährigen Bereitstellung eines Substrates mit gleichbleibenden Eigenschaften. Durch die Ausgestaltung des EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) sind nunmehr von der Betriebsgröße unabhängige Biogas-Anlagengrößen möglich. Die hieraus resultierenden Substratmengen und Massenströme übersteigen die Futtermengen, die in üblichen deutschen Herdengrößen mit ca. 40 Kühen je Betrieb benötigt werden (Tabelle 1).

Tabelle 1 Gegenüberstellung installierter elektrischer Leistung und Großvieheinheiten, eigene Berechnungen

kW_{el.} installiert	250	500	750	1.000
FM Maissilage / Tag [Mg] (Annahme: 420 kWh _{el.} /t FM)	14	29	43	57
Siloraum [m³] (Dichte: 700 kg FM/m ³)	7.463	14.926	22.390	29.853
Großvieh [-]	299	597	896	1.194
Flächenbedarf [ha] (Ertrag 451,4 dt/ha)*	113	234	348	461

DMK 2008

Die Verfahrenskette der Biomassebereitstellung umfasst in der Praxis:

- Anbau & Ernte
- Konservierung & Lagerung
- Entnahme aus dem Silo
- Einbringung in den Fermenter

Die einzelnen Verfahrensschritte sind dabei verlustbehaftet und wirken sich auf die Flächenproduktivität aus. Nur unter Berücksichtigung der gesamt auftretenden Verlustgrößen können flächenspezifische Energieerträge berechnet und verfahrenstechnische Alternativen bewertet werden. In der Literatur werden für Verluste in der Substratbereitstellung oftmals Pauschalgrößen angenommen, die aus Erfahrungen der Pflanzenproduktion und Tierernährung abgeleitet werden. So schwanken Annahmen zu vorgelagerten Verlusten je nach Quelle zwischen 6% KTBL (2006), 10% DANIEL & SCHOLWIN (2008) und 15% GROEBLINGHOFF (2004). Bei suboptimalem Verfahrensmanagement und der speziellen Randbedingungen der Biogaserzeugung erscheinen auch höhere Verluste realistisch (NUSSBAUM, 2009). Gestiegene Substratmengen und von der Tierernährung abweichende Verfahrensschritte lassen eine Übertragung der Verlustgrößen auf die Biogaserzeugung als schwierig erscheinen (THAYSEN, 2007). Bisherige Untersuchungen zum Einfluss der Silierung auf die Biogasausbeute berücksichtigen nicht die gesamte Verfahrenskette der Biomassebereitstellung.

Vor dem Hintergrund des Einsatzes von Silagen zur Energieerzeugung bedarf es der Überprüfung und Anpassung derzeitiger Qualitätsanforderungen an Silagen. Der Einsatz heterofermentativer Milchsäurebakterien ermöglicht die Modifikation des Gärsäuremusters mit einem deutlichen Essigsäuregehalt. Der hieraus resultierende Einfluss auf die gesamte Verfahrenskette der Biogaserzeugung ist in der Literatur bisher wenig diskutiert.

Die Verbesserung der aeroben Stabilität durch die heterofermentative Silierung wird in der Literatur auf den erhöhten Essigsäuregehalt vor aerober Exposition zurückgeführt (MOON, 1983), (HOLZER et al., 2003). Vergleichende Untersuchungen zu stofflichen Veränderungen während der aeroben Exposition zwischen unbehandelten und heterofermentativ silierten Silagen und die Auswirkungen auf den Biogasprozess liegen in der Literatur nur bedingt vor.

Zielsetzungen und Fragestellungen der vorliegenden Arbeit:

- Bilanzierung der Verfahrenskette der Biomassebereitstellung unter Berücksichtigung des verfahrenstechnischen Einflusses der aeroben Exposition auf die Silage
- Quantifizierung von Energieverluste durch aerobe Exposition mittels etablierter Messmethoden
- Einfluss der heterofermentative Silierung auf die Biogaserzeugung
- Vergleichende Untersuchungen zum Verhalten von Silagen unter aerober Exposition
- Einfluss der heterofermentativer Silagen auf weitere Kenngrößen der Silage
- Einfluss weiterer Silagegärprodukte im Biogasprozess

Einführend werden die biologischen Grundlagen der Silierung aus der Literatur dargestellt, ohne die eine weitergehende Beurteilung der verfahrenstechnischen Einflüsse auf die Verlustgrößen nicht möglich ist. Die Ursachen der aeroben Nacherwärmung und ihre besondere Problematik bei der Substratbereitstellung bei Biogasanlagen werden erläutert. Eine grundsätzliche Übersicht zum Einsatz von biologischen Siliermitteln ermöglicht die Einordnung von homo-/ heterofermentativen Siliermitteln in das umfangreiche Angebot an Siliermitteln. Die Grundlagen der Biogaserzeugung und die Verfahrensschritte landwirtschaftlicher Biogasanlagen werden diskutiert.

Die Quantifizierung des Einflusses der Substratbereitstellung auf die Biogasausbeute erfolgte in fünf Silierversuchen. Das zu silierende Material wurde in den Erntejahren 2007 und 2008 von Praxisbetrieben bereitgestellt und in je zwei Behandlungen (unbehandelte Kontrolle, homo-/ heterofermentative Behandlung) im Labormaßstab einsiliert. Der Bilanzrahmen der Versuche umfasst die während der Silierung auftretenden Gärgasverluste sowie Verluste durch eine aerobe Exposition des Substrates.

Der Einfluss der Luftexposition wurde im standardisierten und im DLG anerkannten Verfahren des ASTA-Testes nach HONIG (1999) untersucht. Die Beurteilung des Lufteinflusses erfolgte auf Grundlage der stofflichen und chemischen Veränderungen der Silage sowie der Methanausbeute, in Abhängigkeit der Dauer der Exposition. Zusätzlich zu den Bilanzversuchen wurde der Einfluss der aeroben Exposition an weiteren Silagen aus unterschiedlichem Pflanzenmaterial (Mais, Sorghum) ermittelt.

Die Wirkung verschiedener Silagegärprodukte im Biogasprozess wurde in Batch und Fed-Batch-Versuchen ermittelt.

Mit der vorliegenden Arbeit soll der allgemeinen Forderung an die Wissenschaft und Forschung zur „Verbesserung der Konversionsverfahren von Biomasse in Energie insbesondere bei solchen Verfahren, die die ganze Pflanze nutzen“ (ANONYM, 2009) entsprochen werden. Die verlustarme Bereitstellung der Biomasse zur gasförmigen Energieerzeugung stellt eine Grundvoraussetzung dieser Forderung dar. Ziel der Arbeit ist es, die Effizienz von Biogasanlagen zu steigern.

2 Grundlagen

2.1 Biologische Grundlagen der Silierung

Silierung ist eine Konservierungsmethode von Erntegut durch natürliche Milchsäuregärung. Während des Silierprozesses werden wasserlösliche Kohlenhydrate durch Milchsäurebakterien (MSB) unter anaeroben Bedingungen zu organischen Säuren umgebaut. Die hieraus resultierende pH-Wert-Absenkung soll Gärschädlinge und Enzyme inaktivieren und das Erntegut konservieren McDONALD et al.(1991). Der Silierprozess ist ein unkontrollierter Prozess, dessen Erfolg durch eine Vielzahl an Parametern bestimmt wird (ENDO, 1955), (ZIMMER, 1967), (McDONALD, 1991). Der Silierprozess kann anhand folgender Charakteristika in 4 Phasen eingeteilt werden (ENDO, 1955), (WEINBERG & MUCK, 1996):

- In der **aeroben Phase** beträgt der pH-Wert 6,0 – 6,5, hier ist zwischen den pflanzlichen Partikeln noch Luftsauerstoff vorhanden. Diese Bedingungen ermöglichen der Pflanze Restatmung und Aktivität der Proteasen. Den aeroben und fakultativ aeroben unerwünschten Mikroorganismen wie Hefen, Enterobakterien und Pilzen werden in Abhängigkeit von der Höhe und der Versäuerungs geschwindigkeit Vermehrungschancen eingeräumt. Die aerobe Phase dauert wenige Stunden.
- Die **Gärphase**, die von mehreren Tagen bis zu mehreren Wochen dauern kann, zeichnet sich durch eine Zunahme der anaeroben Verhältnisse aus. Das Pflanzengewebe stirbt ab, Zellinhaltsstoffe werden frei und damit für die Silagemikroflora verfügbar. Laktobakterien entwickeln sich in Konkurrenz zu u.a. Clostridien, Listerien, Enterobakterien sowie Hefepilzen und werden zu der vorherrschenden Mikroorganismenart. Die Gärungsprodukte der Laktobakterien, in erster Linie Milchsäure und andere Gärsäuren, senken den pH-Wert auf ein Niveau von 3,8 – 5,0 ab und unterdrücken so wirksam jegliche säureempfindliche bakterielle Konkurrenz.
- Die **stabile Phase** ist erreicht, wenn durch den Ausschluss von Luftsauerstoff von der Silage keine Veränderung mehr eintreten.
- Während der **Entnahmephase** ist die Silage dem Luftsauerstoff ausgesetzt. Das ermöglicht die Reaktivierung von aeroben Mikroorganismen, hauptsächlich Hefen und Schimmelpilzen, die Nacherwärmung und Verderb verursachen können.

Zur Gewährleistung einer hohen Silagequalität sollte jede Phase des Silierprozesses kontrolliert ablaufen HONIG (1986). Während der Fermentationsphase wird die Höhe der Nährstoffverluste durch die Geschwindigkeit und das Ausmaß der pH-Wert-Absenkung bestimmt.

Die konservierende Wirkung der Silierung beruht einerseits auf dem Luftabschluss, wodurch aerobe Mikroorganismen keine Oxidationsprodukte bilden können und inaktiviert werden, und andererseits

auf der hemmenden Wirkung der durch Gärung gebildeten Säuren. Die gebildeten Gärprodukte senken im Verlauf der Silierung den pH-Wert, und eine sukzessive Hemmung der autochthonen Epiphytenflora setzt, in Abhängigkeit der Wachstumsgrenzen der einzelnen Mikroorganismenart, ein. Eine Zusammenstellung von pH-Wert-Grenzen und -Optima erfolgt von THIMANN (1955) aus verschiedenen Literaturquellen.

THÖNI (1988) hat für verschiedene Silageschädlinge pH-Wert-Grenzen experimentell bestimmt. Unterhalb einem pH-Wert von 4,5 sind Buttersäurebakterien (Clostridien) ebenso wie Acetobacter gehemmt. Hefen und Schimmelpilze können hingegen bis zu einem pH-Wert von < 3 leben. Eine nicht ausreichende pH-Wert-Absenkung führt dementsprechend zu Fehlgärungen durch unerwünschte Gärschädlinge. Mögliche Ursachen für Fehlgärungen sind eine nicht ausreichend verfügbare Menge an leicht verfügbaren Kohlenhydraten oder die ungenügende Verwertung dieser Kohlenhydrate durch silier-untaugliche Milchsäurebakterien.

Der eigentlich hemmende Wirkmechanismus der Ansäuerung wird weniger dem absoluten pH-Wert als der undissoziierten Säure zugeschrieben (ADAMS & HALL, 1988), (JONSSON, 1989), (LINDGREN & DOBROGOSZ, 1990). Das Verhältnis zwischen dissoziiertem und undissoziiertem Säureanteil ist vom pH-Wert abhängig und wird durch die charakteristische Dissoziationskonstante der einzelnen Säuren beschrieben.

Die undissoziierten Säuren sind lipophil und diffundieren durch die Zellmembran (CONWAY & DOWNEY, 1949). Innerhalb des Cytosols dissoziieren die Säuren auf Grund des intrazellulären pH-Wertes und senken so den pH-Wert in der Zelle (MOON, 1983), (BUXTON, 2003). Nach Untersuchungen von PIPER et al. (2001) bewirkt die Anreicherung von Acetat in der Zelle einen hohen Turgor-Druck, was bei ausreichendem Druck zur Plasmolyse führt. Zur Aufrechterhaltung der Homeostase muss das Bakterium Energie, die es zum eigenen Nutzen brauchen würde, aufwenden, um die Protonen wieder auszuschleusen (Uncoupling-Theorie) (RUSSELL, 1992). Als Folge wird sein Wachstum gehemmt, sogar bis zum Erschöpfungstod der Zelle. Da Milchsäure ($pK_s = 3,86$) eine starke Säure ist, liegt ein Großteil der Milchsäure bei Silage typischen pH-Werten von 3,3 – 4,2 dissoziiert vor. Essigsäure mit einer Dissoziationskonstante von pK 4,75 liegt undissoziiert vor. Dies gilt als ein Erklärungsansatz für die bessere Wirkung von Essig- und Buttersäure gegen Hefen, Pilze und Bakterien bei der Silierung.

2.1.1 Siliereignung

Die Siliereignung eines Substrates wird determiniert durch den Trockenmassegehalt und das Säuerungsvermögen. Das Säuerungsvermögen wird aus dem Gehalt an leicht verfügbaren Kohlenhydraten (Zucker) und der Pufferkapazität (PK) berechnet (WEISSBACH et al., 1974). Die Pufferkapazität wird mittels Titration gemessen und gibt die Menge an Milchsäure an, die benötigt wird, um einen pH-Wert von 4,0 zu erreichen. Pufferaktive Substanzen im Erntematerial sind vor allem

Proteine, der alkalische Aschegehalt sowie Pflanzensäuren (WEISSBACH, 1968). Pflanzenmaterial mit einem Z/PK-Quotienten < 2 gelten als schwer silierbar.

Tabelle 2: Vergärbarkeitskennndaten verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999)

Futterpflanze	TM [g/kg]	Rohprotein [g/kg TM]	Zucker (Z) [g/kg TM]	Pufferkapazität (PK) g MS/kg TM	Z/PK-Quotient
Mais	280 (200 – 350)	75	230	35	6,6 (4,7 – 8,8)
Zuckerrübenblatt	145 (120 – 180)	135	285	52	5,5 (1,9 -10,8)
Markstammkohl	155 (140 – 190)	150	290	66	4,4 (3,5 – 5,0)
Grünhafer	220 (145 – 265)	95	130	40	3,3 (2,7 – 4,7)
Felderbse	155 (130 – 165)	180	155	49	3,2 (2,4 – 3,6)
Ackerbohne	150 (110 – 165)	175	145	49	3,0 (1,6 – 3,2)
Süßlupine	150 (120 – 160)	180	115	46	2,5 (1,8 – 3,0)
Gräser	200 (140 – 270)	140	115	47	2,4 (0,8 – 4,6)
Grünroggen	160 (155 – 210)	155	135	56	2,4 (1,6 – 3,3)
Rotklee	200 (165 – 250)	165	115	69	1,7 (0,9 – 1,8)
Luzerne	200 (150 – 220)	190	65	74	0,9 (0,5 – 0,9)

Unter Berücksichtigung des Trockenmassegehaltes lässt sich der Vergärbarkeitskoeffizient über Formel 1 berechnen (SCHMIDT et al., 1971).

Formel 1: Berechnung des Vergärbarkeitskoeffizienten (VK)

$$VK = TM[\%] + 8 \frac{Z}{PK}$$

Z...Zuckergehalt
PK...Pufferkapazität

Mittels des Vergärbarkeitskoeffizienten kann eine Einteilung der Futterpflanze in die Kategorien leicht vergärbar ($VK > 45$), mittelschwer vergärbar ($VK \sim 35$) und schwer vergärbar ($VK < 35$) erfolgen (JEROCH et al., 1999).

Neben verfahrenstechnischen Gründen spielt der Trockenmassegehalt aus biologisch-chemischen Gründen eine wichtige Rolle. Die Intensität der Fermentation und der Anteil der Milchsäuregärung werden nach KNABE et al. (1986) vom TS-Gehalt beeinflusst. Der Grad der Verfügbarkeit des Wassers ist durch chemische und physikalische Bindungen begrenzt und wird durch die Wasseraktivität (a_w) beschrieben. Bei Anwelksilagen wird versucht, über eine Erhöhung des TS-Gehaltes und einer damit verbundenen Absenkung der Wasseraktivität osmointolerante Gärschädlinge wie Enterobakterien und Clostridien zu hemmen. HOEDTKE (2007) weist darauf hin, dass die Abschätzung der Osmolalität über den TS-Gehalt fehlerbehaftet sein kann und schlägt als universellen Parameter den trockenmasseabhängigen Parameter $osmol_{TS}$ vor.

2.1.2 Epiphytische Flora

Die Konservierung des Erntegutes durch Milchsäuregärung setzt eine ausreichend große Anzahl an milchsäureproduzierenden Milchsäurebakterien (MSB) voraus. Die epiphytisch vorkommende Mikroorganismenflora ist in Anzahl und Zusammensetzung starken Schwankungen unterworfen (SPECKMANN, 1981), (MUCK, 1989), (PAHLOW und MÜLLER, 1995). (ADLER et al., 1995, 1997, 2002) stellen in verschiedenen Arbeiten und Literaturstudien allgemeine Einflussfaktoren auf den epiphytischen Besatz zusammen.

Tabelle 3 Einflussfaktoren auf Silage-Mikroorganismen und Gärprozesse aus (ADLER, 2002) in Anlehnung an (WOOLFORD, 1984) und (McDONALD et al., 1991)

-
- Art und Zusammensetzung des Ausgangsmaterials
 - Feuchtigkeitsgehalt, Anwelkung, Verschmutzung
 - Erntetechnik, mechanische Aufbereitung, Zerkleinerung
 - Verdichtung, Abdeckung, Luftabschluss
 - Konservierungsmittel, Silierzusätze
 - Grad der Ansäuerung, Gärsäuremuster
 - Temperatur bei Ein/ -Auslagerung, und während der Lagerphase
-

Zu erkennen ist die Komplexität der Einflussfaktoren und die damit einhergehenden Unwägbarkeiten des epiphytischen Besatzes sowie die daraus resultierenden Unwägbarkeiten der erzielbaren Gärqualität.

Bei Untersuchungen von LIN et al. (1992) zum Verlauf der MSB-Keimzahlen auf Alfalfa-Gras und drei Maishybriden variierte der epiphytische Besatz auf der stehenden Pflanze zwischen weniger als $1,0E+01$ bis $1,0E+05$ $\text{KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ FM. Hingegen wurden auf gehäckseltem Maismaterial unabhängig des Ausgangsbesatzes Keimzahlen von annähernden $1,0E+06$ $\text{KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ FM gefunden. Hierbei war der Einfluss des Häckselns bei Maismaterial größer als bei Gras. Eine Zunahme der Gesamt-MSB auf Grasmaterial unmittelbar nach Mahd bzw. Häckseln wurde ebenfalls von ADLER et al. (1997) festgestellt. Gegenüber dem Feldbestand ($12,5E+03$ $\text{KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ FM) wurden auf dem gemähten Material um den Faktor 2,2 höhere und auf dem gehäckselten Material um den Faktor 26 höhere MSB-Zahlen gefunden.

PAHLOW & MÜLLER (1995) stellen hierzu fest, dass bei hochtourig erfolgreicher mechanischer Aufbereitung beträchtliche Anteile an fein zerkleinertem Pflanzenmaterial und freigesetzten Zellinhaltsstoffen entstehen, die durch die epiphytischen MSB schneller umgesetzt werden können. Die Zunahme der Anzahl von MSB im Erntematerial gegenüber der Anzahl auf der Pflanze wird als „Chopper inoculation phenomenon“ bezeichnet.

Keinen gerichteten Einfluss auf die Gärqualität und aerobe Stabilität zeigten unterschiedliche Häcksellängen (5,5; 14 und 21 mm) bei LEURS (2005). HERRMANN (2008) ermittelt bei 4 variierenden Häcksellängen (4, 6, 8 und 12 mm) nur geringe Unterschiede in der Silagequalität. Bei Maismaterial zeigte die kürzeste Häcksellänge mit 1% Frischmasseverlusten den höchsten

Gärgasverlust, mit steigender Häcksellänge (6 und 8 mm) sanken die Gärgasverluste, bei 12 mm stiegen die Gärgasverluste wieder an. Bei der Silierung von Triticale konnte keine gerichtete Abhängigkeit der Häcksellänge auf die Gärgasverluste ermittelt werden. Während der Einfluss der Häcksellänge auf das Gär säuremuster und die Gärgasverluste teilweise ungerichtet war, konnte mit sinkender Häcksellänge eine steigende Methanausbeute ermittelt werden (HERRMANN, 2008).

RUSER (1989) konnte an Untersuchungen von gehäckseltem Maismaterial eine Vielzahl von MSB-Gruppen differenzieren, wobei homofermentative Arten wie z.B. Lactobacilli und Leuconostocs dominierten. Lin stellt hierzu fest, dass auf stehendem Mais der epiphytische Besatz nahezu gänzlich von homofermentativen MSB besetzt ist (LIN et al., 1992).

Eine Konzentration an MSB von $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ wird von CAI et al. (1999) als genügend für eine ausreichende pH-Wert-Absenkung während der Silierung gesehen. WEISSBACH & HONIG schlussfolgern aus Untersuchungen von 295 Grünfuttersilagen ebenfalls eine Mindestkeimdichte von $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$, um aus Grünfuttersilagen mit einem VK von > 35 buttersäurefreie Silage zu erstellen (WEISSBACH & HONIG, 1996).

Hauptgärungsvorgänge sowie Ausbeuten an Trockenmasse und Energie sind in Tabelle 4 für epiphytisch vorkommende Flora angegeben.

Tabelle 4 Fermentationsprodukte sowie Trockenmass- und Energieausbeuten der Hauptgärungsvorgänge von Silagemikroorganismen (nach ROOKE & HATFIELD, 2003)

Organismen	Fermentationsweg	Substrat	Produkte	Ausbeute (%)	
				TM	Energie
MSB	homofermentativ	1 Glucose	2 MS	100	96,9
MSB	heterofermentativ	1 Glucose	1 MS + 1 ES	83	79,6
MSB	heterofermentativ	1 Glucose	1 MS + 1 Ethanol	83	97,2
Hefen		1 Glucose	2 Ethanol	51	97,4
Clostridien		1 Glucose	1 BS	66	77,9
Enterobakterien		2 Glucose	2 MS + 1 ES + 1 Ethanol	83	88,9

MSB=Milchsäurebakterien, MS=Milchsäure, ES=Essigsäure, BS=Buttersäure, TM=Trockenmasse

Die höchste Trockenmasseausbeute erzielt die homofermentative Silierung, bei der aus einem mol Glucose 2 mol Milchsäure gebildet werden. Heterofermentative Gärungswege erzielen auf Grund des im Gärungsprozess gebildeten CO_2 geringere Trockenmasseausbeuten. Unter Berücksichtigung der energiereichen Stoffwechselprodukte erzielt der heterofermentative Gärungsweg mit den Stoffwechselprodukten Ethanol und Milchsäure eine höhere Energieausbeute als der homofermentative Gärungsweg.

Eine Ableitung der Gärqualität auf Grundlage des epiphytischen Besatzes ist nicht möglich (LIN, 1992). Durch die Konkurrenzsituation zwischen MSB und Schadorganismen um die wasserlöslichen Kohlenhydrate können sich nur MSB-Stämme durchsetzen, die durch eine schnelle Ansäuerung, den pH-Wert unterhalb der Wachstumsgrenzen der Substratkonkurrenten absenken. So ist es möglich, dass sich auch zahlenmäßig im Ausgangsmaterial gering vertretene MSB, im Laufe der Silierung gegenüber anderen Bakterien durchsetzen.

2.1.3 Silierverluste

Silierverluste umfassen alle bei der Silagebereitung, der Lagerung sowie der Auslagerung entstehenden Verluste. Diese setzen sich aus Energie- und ebenso aus Trockenmasseverluste zusammen. Die gesamte Verlusthöhe ist in der Praxis von verschiedenen Faktoren abhängig und in der Höhe sehr variabel. Siliertechnik und Pflanzenmaterial beeinflussen entscheidend die Silierverluste.

Eine exakte Erfassung von Silierverlusten in Praxisversuchen gestaltet sich infolge großer Streuung der Messwerte sehr schwierig (ZIMMER, 1967), (WOOLFORD, 1984), (McDONALD et al., 1991), (WEISSBACH, 1998), (BUXTON et al., 2003). Eine Bestimmung der Trockenmasseverluste im Praxismaßstab, über die in einen Silo eingebrachte Trockenmasse und die Ermittlung der ausgelagerten Trockenmasse, ist mit erheblichen Zufallsfehlern behaftet (WEISSBACH, 1998). Eine Vereinfachung dieser Methode stellt die Bilanznetzuntersuchung dar. Die mit dem Siliergut gefüllten Netzbeutel werden im Silo vergraben und bei der Entleerung wieder entnommen. Eine Übertragung der hieraus gewonnenen Ergebnisse auf den gesamten Silostock scheint aber weiterhin fraglich.

Eine Übersicht der in der Praxis auftretenden Verlustarten sowie mögliche Größenordnungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Ermittlungen der in der Literatur angegebenen Silierverluste erfolgt vielfach in kleinmaßstäblichen Praxissilos unter optimalen Versuchsbedingungen. Eine Übertragung auf die Silierung von großen Biomassen in der Praxis kann nicht vorgenommen werden, wie die nachfolgend erläuterten Aspekte zeigen.

Tabelle 5 Übersicht von Verlustarten und Verlusthöhen bei der Silierung nach ZIMMER (1967)

Verlustart		Größenordnung
Restatmung	Unvermeidbar	1 – 2%
Vergärung	Unvermeidbar	2 – 4%
Sickersaft	Verf.-Abhängig	0 – 8%
Feldverluste	Verf.-Abhängig	1 – 5%
Fehlgärung	Vermeidbar	0 – > 10%
Aerober Verderb	Vermeidbar	0 – > 10%

Luftabschluss:

Die Höhe der Verluste bis zum Eintrag in den Fermenter ist neben den beschriebenen biotischen Faktoren wie z.B. epiphytischer MSB-Besatz, Vergärbarkeit des Ausgangsmaterials stark von verfahrenstechnischen Bedingungen determiniert.

Derzeitige Empfehlungen und Erfahrungen für die Silierung spiegeln die Größe der landwirtschaftlichen Betriebe und der daraus resultierenden Futtermenge in Deutschland wider. Der Substratbedarf von Biogasanlagen und die Weiterentwicklung in der Erntetechnik stellen neue Herausforderungen an die Ernte- und Siliertechnologie. Die Erzielung einer schnellen Anaerobiose im Silo stellt sich hierbei ebenso problematisch dar wie eine optimale Verdichtung des Silos bei steigender Bergeleistung der Erntemaschinen THAYSEN (2009).

Restatmung:

Restatmungsverluste entstehen in der ersten Phase der Silierung solange noch Luft im Silostock vorhanden ist oder durch einen unvollständigen Luftabschluss die Anaerobiose verzögert wird. Durch pflanzliche Restatmung sowie durch aerobe und fakultativ aerobe Mikroorganismen kommt es zu aerobem Nährstoffabbau, der mit einer Erwärmung des Silos verbunden ist. Eine verlustarme Konservierung ist aus diesem Grund bei dauerhaftem Luftsauerstoffeinfluss durch fehlende oder defekte Abdeckungen kaum möglich. Trockenmasseverluste in nicht abgedeckten Silagen sind unausweichlich (RUXTON, 1959), (MUCK, 1999), (NUSSBAUM, 2009).

Luftsauerstoff, der im Ernteprozess eingebracht wird, hat nur wenig Einfluss auf den Siliererfolg, wenn ein unverzüglicher Luftabschluss gewährleistet ist. Verfügbarer Restsauerstoff wird durch Pflanzenrespiration und die Atmung verschiedener Aerobier innerhalb kürzester Zeit aufgebraucht ADLER et al. (1997). WEISE und HERTWIG (2009) definieren eine kurze Befüllzeit mit 1 bis 2 Tagen und fordern bei mehrtägiger Befüllung eine Zwischenabdeckung.

HONIG (1969) untersuchte mit Gasbilanzversuchen und dem Einsatz von Bilanzbeuteluntersuchungen den Einfluss unterschiedlicher, nicht näher definierter Luftmengen auf Verluste, Qualität und Haltbarkeit von Gärfutter. Grasmaterial wurde hierfür in Laborsiloplanzen der FAL (das jetzige JKI) siliert und mit unterschiedlichen Luftzufuhrzeiten beaufschlagt. Im Bereich des Lufteintrags wurden in Abhängigkeit der Luftmenge Trockenmasseverluste in Höhe von 11, 18 und 34% (mit steigender Luftmenge) ermittelt.

Nach OELBERG et al. (1983) sind schon Sauerstoffraten von $(100\text{--}150 \text{ mg O}_2 \cdot \text{kg TM}^{-1})$ ausreichend, um einen aeroben Verderb einzuleiten. Die Silierung mit Folienabdeckung führte zu Trockenmasseverlusten von 3,8% gegenüber 32% ohne Folienabdeckung.

McLAUGHLIN (1978) konnte an nicht abgedeckten Silos in der Abdeckschicht Trockenmasseverluste von 60% feststellen. BOLSEN (1993) untersuchte an Laborsilos den Einfluss von Abdeckungen. Innerhalb der oberen 30 cm gab es einen schnellen Verderb des Materials. Nach 90 Tagen konnten signifikante Trockenmasseverluste nachgewiesen werden.

Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss nicht abgedeckter Silos wurde von MUCK (1999) in Laborsilos ($\varnothing 15 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ Höhe) mit Alfalfa-Gras und Maissilage durchgeführt. Sauerstoff- und

Kohlendioxidgehalt sowie die Mikroorganismenflora wurden in 5, 20, 35 und 50 cm Tiefe unterhalb der Oberfläche im zeitlichen Verlauf bis 28 Tage nach Silierung untersucht. Innerhalb des Versuchszeitraums wurden Trockenmasseverluste im Bereich bis 35 cm ermittelt. 5 cm unterhalb der Oberfläche stellten sich mit 37 – 55% Trockenmasseverluste die höchsten Verluste ein. Im Untersuchungszeitraum stieg der Sauerstoffgehalt in den tieferen Schichten an. Am Tag 28 konnten in 35 cm Tiefe 5% Sauerstoff gefunden werden, während zu den Untersuchungszeitpunkten vorher (Tag 1 & 14) kein Sauerstoff gemessen wurde. Der Autor schließt nicht aus, dass bei längerer Silierdauer auch der Bereich tiefer als 35 cm aerobem Verderb unterliegen kann. Ergebnisse von ROITSCH (2009) und NUSSBAUM (2009) bestätigen dies. In nicht abgedeckten Praxissilos konnte über die Höhe des Silos eine Abnahme des Trockenmassegehaltes sowie der Energiedichte (Netto-Energie-Laktation) im Rahmen der Bilanzierung von Praxisbiogasanlagen festgestellt werden (ROITSCH 2009). Der Trockenmassegehalt sank von 31,2% im unteren Bereich auf 28,3% im mittleren und bis auf 19,1% im oberen Drittel eines nicht abgedeckten Silostocks. Die Energiedichte sank von 6,7 MJ NEL•kg⁻¹ TM unten, bzw. 6,8 MJ NEL•kg⁻¹ TM auf 6,2 MJ NEL•kg⁻¹ TM im oberen Drittel des Silos (ROITSCH, 2009).

Untersuchungen an Praxissilos mit Begrünung anstelle von Folienabdeckungen wurden von NUSSBAUM (2009) durchgeführt. Einsaaten von Sudangras, Getreide oder einem Gemisch aus Getreide, Raps und Ackerbohnen führten ebenso wie eine Abdeckung aus gehäckseltem Ölrettich zu einer Abnahme der Energiedichte und einem Anstieg des Rohfasergehaltes in den obersten Schichten des Silos.

Laborversuche zur Bestimmung der Gärgasverluste in Abhängigkeit der Silierdauer und der Anaerobiose wurden von RICHTER (2008) durchgeführt. Maissilagen, ohne Luftstress siliert, zeigten mit einer Steigerung der Silierdauer von 49 Tagen auf 90 Tagen nur einen geringen Anstieg der Gärgasverluste von 3,2 auf 3,4%. Der Einfluss von Luftstress nach DLG-Prüfrichtlinie führte schon am Tag 49 zu Gärgasverlusten von 3,8%. Ohne Abdeckung entstanden Gärgasverluste von 63,8%.

Trockenmasseverluste im Silo stellen die ultimative Konsequenz einer nicht vollständigen Anaerobiose dar. Bereits im Vorfeld kommt es aber zu nicht unerheblichen Verschiebungen in der mikrobiellen Population. Einen Anstieg der Hefepopulation durch Silierung unter Lufteinfluss beobachteten (WOOLFORD, HONIG & FENLON, 1977). Der Lufteinfluss führte zu einer Erhöhung der Hefepopulation um 1,0E+03 bis 1,0E+04 gegenüber einer vollständig anaerob gelagerten Kontrollsilage. Die Belüftungsrate des Silos wurde dabei mit 1 L Luft • kg TM⁻¹ • Tag⁻¹ festgelegt, einer aus Praxisdaten abgeleiteten Annahme. Ausgelöst durch die höhere Hefenpopulation zeigte die Silage eine schnellere und höhere Temperaturentwicklung verbunden mit Veränderungen der chemischen und biologischen Parameter bei Auslagerung (WOOLFORD et al., 1977, 1978). Die verzögerte Anaerobiose im Silo verhindert somit eine rasche pH-Wert-Absenkung durch anaerobe Mikroorganismen und begünstigt die Entwicklung aerober Mikroorganismen (HONIG, 1991). McGECHAN (1990) stellt hierzu ebenfalls fest, dass bei Grassilagen optimales Anwelken und der Zusatz von Siliermitteln keine ausreichende Silagequalität garantieren, wenn während der Silagelagerung die anaeroben Bedingungen nicht zuverlässig erhalten bleiben. Ein sofortiges Abdecken des Silostocks ist somit für eine verlustarme Konservierung zwingend. Problematisch stellt

sich dies bei Unterbrechung der Silierung dar. Wird die Sauerstoffzufuhr in den Silostock bei Befüllpausen nicht durch eine Zwischenabdeckung unterbunden, sind weitreichende aerobe Umsetzungsprozesse zu erwarten. WEISE & HERTWIG (2009) ermittelten nach einer Befüllpause von 48 Stunden eine Temperaturerhöhung von 13°C in 25 cm Tiefe bei nicht abgedecktem Silo, während bei zugedektem Silo die Temperaturerhöhung nur 4°C betrug.

Andererseits hatte eine um 3 Stunden verzögerte Abdeckung keine ungünstigen Auswirkungen KIM & ADESOGAN (2006). Dies scheint im Wesentlichen aus dem sehr kurzen Zeitraum und der Verdichtung im Silo zu resultieren. Eine Zwischenlagerung in lockerer Haufenlagerung von 24 Stunden vor Silierung erhöhte dagegen den Hefenbesatz um den Faktor 1000 bei einer zeitgleichen Reduzierung wasserlöslicher Kohlenhydrate um 50% (MILLS & KUNG, 2002).

Gärgasverluste:

Der Gärverlust stellt den bei der Silierung entstehenden Trockenmasseverlust durch Gärgasbildung dar. Bei Bestimmung der Gärverluste im Labor durch Wiegung der Silobehälter vor und nach Silierung muss nach WEISSBACH (1998) die im Silo verbliebene CO₂-Menge berücksichtigt werden. Der Autor empfiehlt für die Bestimmung von Gärverlusten den gelösten CO₂ mit 2,5 zu berücksichtigen (Formel 2). Die Höhe des gelösten CO₂ wurde dabei aus empirischen Daten von BERG (1971) gemittelt.

Formel 2 Berechnung Gärgasverluste (GV) nach WEISSBACH (1998); MD: Massendifferenz vor/ nach Silierung

$$GV[\%] = 100 \cdot \frac{MD [g]}{TM \text{ Einwaage [g]}} + 2,5$$

Nach einem Vorschlag von GROSS und RIEBE (1974) sowie HONIG und PAHLOW (1986) kann der im Silo verbleibende Teil CO₂ durch Einbeziehung des Faktors 1,4 berücksichtigt werden. Nach WEISSBACH (1998) schwankt dieser Quotient aber in weiten Bereichen, so dass der GV bei einem niedrigen Verlustniveau erheblich unterschätzt und bei einem hohen Verlustniveau erheblich überschätzt wird.

Formel 3 Berechnung Gärgasverluste (GV) nach GROSS und RIEBE (1974); MD: Massendifferenz vor/nach Silierung

$$GV[\%] = 100 \cdot \frac{MD [g]}{TM \text{ Einwaage [g]}} \cdot 1,4$$

2.1.4 Silageabwasserfraktion

Bei der Silierung, Lagerung und Entnahme können folgende Silagesickersäfte auftreten (ANONYM, 2008):

- Gärsaft
Gärsaft ist die bei der Gärfutterbereitung durch Zellaufschluss oder Pressdruck entstehende säurehaltige Flüssigkeit. Der anfallende Gärsaft wird oftmals als Sickersaft bezeichnet.
- Sickersaft
Sickersaft ist eine wässrige Lösung von Silageinhaltsstoffen, die entsteht, wenn Niederschlagswasser während der Lager- und Entnahmeperiode durch die Silage dringt und sich mit organischen Stoffen anreichert.
- Durch Silage verunreinigtes Niederschlagswasser
Verunreinigtes Niederschlagswasser entsteht, wenn Niederschlagswasser mit Silage in Verbindung kommt. Anzusprechen sind hier die Anschnittfläche und die bereits geräumte Siloplatte, auf der sich Silagereste oder Gär- und Sickersaft befinden.

Bedeutendste Faktoren für die Menge sowie den zeitlichen Verlauf des Gärsaftanfalls aus Flachsilos sind nach KAHLSTATT (1999):

- Trockenmassegehalt des Erntegutes bei der Einlagerung
- Pflanzenart/ -sorte
- statische Vertikaldruckverhältnisse im Lagerbehälter
- Grad der mechanischen Aufbereitung
- Wasserleitfähigkeit im Futterstapel
- Einsatz bestimmter Siliermittel.

WYSS (1996) folgert aus Untersuchungen, dass der TS-Gehalt am besten geeignet ist, um die Bildung von Gärsaftanfall abzuschätzen. Von verschiedenen Autoren wurden Regressionsgleichungen zur Abschätzung der Gärsaftproduktion in Abhängigkeit des Trockenmassegehaltes und des Vertikaldruckes aufgestellt (Überblick in KAHLSTATT (1999)). Für Silohöhen zwischen 1,5 und 2 Metern ergeben die Regressionsgleichungen Trockenmassegehalte zwischen 27 und 30% als Grenzwert der Sickersaftbildung. Eine Extrapolation der Gleichungen ergibt für Mais mit 30% Trockenmassegehalt eine theoretische Stapelhöhe von 12 m ohne Gärsaftabfluss, wohingegen WYSS (1995) auch bei 30% TS-Gehalt noch Gärsaftbildung bilanzieren konnte. Hieraus empfiehlt der Autor Mais erst mit einem TS-Gehalt von 32% zu ernten, weist aber auf die vermehrten Probleme möglicher Nacherwärmung bei höheren TS-Gehalten hin.

Neben dem Trockenmassegehalt beeinflussen weitere pflanzenphysiologische Parameter den Gärsaftanfall WYSS (1996). Untersuchungen des Autors zeigen, dass bei Grassilagen mit ähnlichem TS-Gehalt mit Unterschieden im Rohfaser- und Rohproteingehalt unterschiedliche Mengen an Gärsaft

anfallen. Kein Gärsaft trat bei Silagen mit hohen Rohfasergehalten und niedrigeren Gehalten an Rohprotein auf. Die Ursache wird hier in der schlechteren Verdichtbarkeit des rohfaserreichen Materials gesehen und ein damit einhergehender geringerer Anpressdruck.

Die Schnittlänge des Futters kann ebenso Einfluss auf die Gärsaftbildung nehmen. Kürzere Schnittlängen oder Häckselgrade führten bei WYSS (1996) bei Grassilagen zu größeren Mengen an Gärsaft. Neben der Gärsaftmenge ist der Verlauf des Gärsaftanfalls nach WYSS (1995) vom TS-Gehalt abhängig. Für Silagen mit einem TS-Gehalt von 25% fällt rund ein Drittel der gesamten Menge innerhalb der ersten 10 Tage an, bei TS-Gehalten von 30% dauert dies zwischen 3 und 5 Wochen. Auch nach 4 Monaten zeigten die Silagen noch Gärsaftbildung. Die Gesamtsiliverluste der Silagen mit 25% Trockenmassegehalt schwankten zwischen knapp 4% und 7% TM mit einem Sickersaftverlust von ca. 2%. Bei Erhöhung des Trockenmassegehaltes auf 30% TM reduzierten sich die Gesamtsiliverluste auf 3 bis 4,5% TM und die Sickersaftverluste auf unter 1%.

Silagesickersaft setzt sich aus pflanzlichen Bestandteilen wie Pflanzenzucker, Zellsaft, etc. sowie den bei der Silierung entstehenden Säuren und Alkoholen zusammen und stellt damit ein energiereiches Substrat dar. Der BSB₅-Gehalt von Silagesickersaft liegt nach KAHLSTATT (1999) im Mittel bei $51.400 \pm 21.479 \text{ mg O}_2 \bullet \text{L}^{-1}$. THAYSEN (2009) geht von $> 30.000 \text{ mg O}_2 \bullet \text{L}^{-1}$ aus. Werte zwischen 37.500 und 42.624 $\text{mg} \bullet \text{L}^{-1}$ ermittelt WYSS (1996). Das Auftreten von Sickersäften ist somit nicht nur aus wasserrechtlichen und umweltrelevanten Gründen (Cross-Compliance), sondern auch aus energetischer Sicht zu verhindern

2.1.5 Silierzusätze

McDONALD (1991) charakterisiert Silierzusätze in 5 Hauptgruppen. Die Gruppen umfassen Zusätze zur Stimulierung der Fermentation (MSB und Kohlenhydratquellen), Fermentationshemmer (mineralische Säuren, Ameisensäure, Essigsäure, Propionsäure und andere organische Säuren, Formaldehyd, Schwefeldioxid, Natriumhydrogensulfit, Ammoniumhydrogensulfat, Natriumchlorid, Natriumhydroxid), Mittel zur Verhinderung des aeroben Verderbs, sowie Nährstoffe und Absorptionsmittel.

Im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 sind Siliermittel als Stoffe definiert, die Futtermitteln zugesetzt werden, um die Silageerzeugung zu verbessern, und Enzyme und Mikroorganismen enthalten können. Der Einsatz von Siliermitteln – gleich welcher Art – hat stets den Zweck, unerwünschte Mikroorganismen an ihrer Entwicklung zu hindern, Nährstoffverluste zu senken und die Futterqualität zu erhalten. Eine Gruppierung kann entsprechend der Wirkungsrichtung und Art der wirksamen Bestandteile vorgenommen werden (Tabelle 7). Zum besseren Überblick der am Markt erhältlichen Siliermittel wurde von der DLG (Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft) das DLG-Gütezeichen für Siliermittel im Jahr 1990 mit der Verabschiedung einer Prüfrichtlinie wieder eingeführt. Siliermittel werden demnach in 5 verschiedene Gruppen eingeteilt (STAUDACHER et al. 1999; PAHLOW & HONIG 1986; DLG 2000) (Tabelle 6). Ein Siliermittel erhält von der DLG nur dann

ein Gütezeichen, wenn seine Wirksamkeit in einer der Gruppen 1 bis 5 durch Versuchsergebnisse – entsprechend den Anforderungen der Bestimmung – belegt ist (THAYSEN et al., 2007).

Tabelle 6 Wirkungsrichtungen der von der DLG geprüften Siliermittel DLG (2000)

Gruppe 1a:	Mittel zur Verbesserung des Gärverlaufes für schwer silierbares Futter Vergärbarkeitskoeffizient (VK) < 35
Gruppe 1b:	Mittel zur Verbesserung des Gärverlaufs für mittelschwer bis leicht silierbares Futter im unteren TM-Bereich VK ≥ 35; TM ≤ 35%
Gruppe 1c:	Mittel zur Verbesserung des Gärverlaufes für leicht silierbares Futter im oberen TM-Bereich VK ≥ 35; TM ≥ 35% bis ca. 50% ¹
Gruppe 2:	Mittel zur Verbesserung der aeroben Stabilität
Gruppe 3:	Mittel zur Reduzierung von Gärsaftablauf
Gruppe 4:	Mittel zur Verbesserung von Futterwert und Leistung der Tiere
Gruppe 5:	Mittel mit zusätzlicher Wirkung

¹⁾ Durch zu geringe Wasserverfügbarkeit bedingte Wirkungsgrenze

**Tabelle 7 Systematik der Siliermitteltypen nach Wirkungsrichtung und Wirkprinzip
(WEISSBACH 2005) zitiert aus THAYSEN et al. (2007)**

Kategorie	Wirksame Bestandteile	Wirkprinzip	Anwendungsbereich
1. Siliermittel zur Verbesserung des Gärverlaufes (Sicherung der Gärfutterqualität)			
MS-Bakterien-Impfkulturen (MSB_{ho})	Homofermentative MS-Bakterien Verschiedener Gattungen und Arten (z.B. <i>Lactobacillus plantarum</i> / <i>lactis</i> , <i>Pediococcus</i> -/ <i>Enterococcus</i> -Arten u.a.)	Steuerung des Gärungsverlaufes durch beschleunigte MS-Gärung und pH-Wert-Absenkung, dadurch indirekte Hemmung von Fehlgärungen	Leicht und mittelschwer vergärbare Siliergut, dessen TM um höchstens 50g/kg unter TM _{min} liegt (Gras, Klee, Mais-GPS, Getreideganzpflanzen)
Neutralsalze und Silierlösungen (Chem)	Konservierungsstoffe (z.B. Formiat, Propionat, Benzoat, Sulfit, Nitrit, Hexamethylentetramin u.a.) mit spezifischem Hemmeffekt auf Fehlgärungserreger sowie Mischungen dieser Stoffe	Steuerung des Gärungsverlaufes durch Hemmung von Fehlgärungserregern, dadurch indirekte Förderung von MS-Gärung und pH-Wert-Absenkung	Mittelschwer und schwer vergärbare Siliergut, dessen Anwelkgrad um bis zu 100 g TM/kg unter TM _{min} liegt (Gras, Klee, Luzerne)
Säuren (Chem)	Konzentrierte organische Säuren, insb. Ameisensäure (allein oder in Kombination mit anderen Säuren), in einzelnen Produkten teilweise durch Ammoniak abgepuffert	Direkte pH-Wert-Absenkung → Gärungsintensität↓ Bei hoher Dosis Unterdrückung aller Gärungsprozesse/ Mikroorganismen. Bei moderater Dosis: Hemmung von Fehlgärungsverursachern	Mittelschwer und schwer vergärbare Siliergut, dessen Anwelkgrad um bis zu 100 g TM/kg unter TM _{min} liegt (Gras, Klee, Luzerne)
2. Siliermittel zur Verbesserung der Haltbarkeit an der Luft (Sicherung der aeroben Stabilität)			
MS-Bakterien-Impfkulturen (MSB_{he})	Heterofermentative MS-Bakterien (z.B. <i>Lactobacillus buchnerii</i> / <i>brevis</i> u.a.)	Steuerung des Gärungsverlaufs → neben MS entstehen zusätzlich Essigsäure für die Hemmung von Hefe	Leicht vergärbare Siliergut, insb. solches mit hohem TM-Gehalt (Mais-GPS, Maiskolbenprodukte, stark angewelltes Gras)
Neutralsalze und Siliersalzlösungen (Chem)	Konservierungsstoffe (z.B. Acetat, Propionat, Benzoat, Sorbat, Sulfit u.a.) mit spezifischem Hemmeffekt auf Hefen und Schimmelpilze sowie Mischungen aus diesen Stoffen	Hemmung von Hefen und Schimmelpilzen durch die aus den Salzen in der Silage freigesetzten Säuren (Propionsäure, Benzoesäure usw.)	Leicht vergärbare Siliergut, insb. solches mit hohem TM-Gehalt (Mais-GPS, Maiskolbenprodukte, stark angewelltes Gras) sowie verschiedene Silagen ¹⁾
Säuren (Chem)	Konzentrierte org. Säuren, insb. Propionsäure allein oder in Mischungen mit anderen Säuren (Essig-, Sorbin-, Benzoesäure), in einzelnen Produkten ²⁾	Direkte Hemmung von Hefen und Schimmelpilzen bei gleichzeitiger pH-Wert-Absenkung	Leicht vergärbare Siliergut, insb. solches mit hohem TM-Gehalt (Mais-GPS, Maiskolbenprodukte) sowie verschiedene Silagen ¹⁾

MS=Milchsäure GPS=Ganzpflanzensilage

¹⁾ aus Feuchtgetreide, Treber, Schlempe und Pressschnitzeln ²⁾ teilweise durch Ammoniak gepuffert

2.1.6 Biologische Silierzusätze

Die Bedeutung des Siliermitteleinsatzes in der Futterkonservierung steigt fortwährend an. Biologische Siliermittel werden in einer Vielzahl an Handelsprodukten angeboten und haben nach Marktanalysen aus den 90'er Jahren den größten Marktanteil unter den Silierzusätzen WILKINSON und STARK (1992). Grundsätzlich sind bei der Silagebereitung zwei Risiken für den Konservierungserfolg zu unterscheiden (THAYSEN et al., 2007):

1. Fehlgärungen, die durch unerwünschte Bakterien, vor allem Clostridien, verursacht werden und die zu einer schlechten Silagequalität führen
2. Verderb der Silage unter Lufteinfluss, der hauptsächlich durch Hefen und Schimmelpilze verursacht wird, d.h. eine ungenügende aerobe Stabilität der Silage (u.a. mit der Folge einer Nacherwärmung, hieraus resultierend eine Vermehrung von Schimmelpilzen, mit Mykotoxinbildung und Nährstoffverlusten)

REES (1997) fordert für MSB als Silagestarter folgende Charakteristika:

- Hohe Vermehrungsrate und Konkurrenzkraft gegenüber anderen Mikroorganismen
- Homofermentativer Gärungsverlauf und eine schnelle Produktion von Milchsäure
- Säuretoleranz (bis ca. pH 4) und eine schnelle pH-Wert-Absenkung
- Fermentation eines breiten Kohlenhydratspektrums
- Keine Bildung von Dextrin aus Saccharose
- Keine Bildung von Mannitol aus Fructose
- Kein Abbau von organischen Säuren
- Hohe Thermotoleranz (ca. 5 – 50°C) sowie Osmotoleranz
- Formulierung als Pulver oder Granulatform möglich

2.1.6.1 Milchsäurebakterien

Ein Ansatz, um Fehlgärungen durch unerwünschte Mikroorganismen während der Silierung zu verhindern, ist die Zugabe von MSB zur Unterstützung der vorhandenen epiphytischen Bakterien. Der Einsatz von MSB zur Verbesserung der Silierung wird von verschiedenen Autoren dargestellt McDONALD (1991) BOLSEN et al. (1992). Zur Verbesserung des Gärungsverlaufes werden im Wesentlichen homofermentative MSB eingesetzt WEISSBACH (2005). Eine Verbesserung der aeroben Stabilität wurde in Silagen mit erhöhtem Essigsäuregehalt nachgewiesen DRIEHUS (1999), DANNER (2003). Die Zugabe von heterofermentativen MSB führt zu höheren Essigsäuregehalten und

einer damit verbundenen verbesserten aeroben Stabilität DANNER (2003). Vielfach werden Kombination aus homo- und heterofermentativen MSB eingesetzt (WEINBERG, 2002)

Klassische Verfahren zur Differenzierung von Bakterienarten erfolgen durch morphologische Merkmale (Zellform, Zellverbünde etc.). Eine gängige Differenzierung der Milchsäurebakterien wird auf Grundlage des charakteristischen zellulären Stoffwechsels (Kohlenhydratspektrum, Säuerungsverhalten, Stoffwechselprodukte) vorgenommen. Genauere Identifikationsverfahren wie die Bestimmung der chromosomalen DNA sind für MSB-Stämme in Entwicklung und zum Teil bereits einsatzfähig KLOCKE et al. (2004) SCHMIDT et al. (2009).

MSB werden auf Grundlage ihres Stoffwechsels und den damit verbundenen Hauptstoffwechselprodukten, Milchsäure und Essigsäure, sowie des Stoffwechselweges in drei Gruppen eingeteilt (McDONALD, 1991), (REES, 1997):

1. obligat homofermentative MSB

Milchsäurebakterien der ersten Gruppe besitzen die Fructose-1,6-diphosphat-aldolase und können Hexosen über den Embden-Meyerhof Weg katabolisieren. Milchsäure stellt mit 85% das Hauptabbauprodukt dar. Pentosen und Gluconate können auf Grund der fehlenden Phosphoketolase nicht fermentiert werden.

2. fakultativ heterofermentative MSB

Hexosen werden über den Embden-Meyerhof-Weg hauptsächlich zu Milchsäure abgebaut. Unter verschiedenen Bedingungen erfolgt ein heterofermentativer Abbau und zusätzliche Produkte wie Essigsäure, Ethanol, CO₂ und Ameisensäure werden produziert. Neben dem Enzym Aldolase besitzt diese Gruppe die Phosphoketolase, so dass nicht nur Hexosen, sondern auch Pentosen abgebaut werden können. Die Pentose abbauenden Enzyme sind aber in Gegenwart von Hexosen unterdrückt.

3. obligat heterofermentative MSB

Hexosen und Pentosen werden über den 6-Phosphogluconate-Weg abgebaut. Neben Milchsäure werden Essigsäure, Ethanol, einige andere organische Säuren und Kohlendioxid produziert.

Neben der Produktion von organischen Säuren (Milchsäure, Essigsäure) können MSB weitere Substanzen im mmol-Bereich produzieren (De VUYST und VANDAMME, 1994) (NIKU-PAAVOLA et al., 1999) (ZHENNAI, 2000) (STROEM, 2005). Diese werden in wesentlich geringerem Maße von den MSB produziert und umfassen Substanzen wie 1,2-Propandiol, Ameisensäure, Ethanol, Wasserstoffperoxid, Diacetyl, Acetoin, 2,3-Butandiol, Acetaldehyde, Benzoate sowie komplexe Stoffe wie die bakteriolytisch wirkenden Enzyme Bacteriocin und Antibiotika. Die Wirksamkeit der

verschiedenen Substanzen beschränkt sich oftmals auf bestimmte Bakteriengruppen. So beschreibt JAY (1982), dass Diacetyl effektiver gegen gram-negative Bakterien, Hefen und Pilze wirkt als gegen gram-positive. Reuterin hingegen wirkt gegen beide Gruppen (De VUYST & VANDAMME, 1994).

Die Menge der antimikrobiellen Substanzen, ausgenommen die organischen Säuren, ist sehr gering. GILLILAND (1985) geht darum für Diacetyl davon aus, dass die antibakterielle Wirkung bei Milchsäuregärung gering ist, es aber zu synergetischen Effekten kommen kann.

2.1.6.1.1 Homofermentative MSB

Prinzip der Silierung ist die ausreichende Bildung von Milchsäure zur pH-Wert-Absenkung und die damit einhergehende Hemmung von Schadorganismen sowie die Unterbindung von enzymatischen Abbauvorgängen. Epiphytisch vorkommende Mikroorganismen sind in Anzahl und Zusammensetzung starken Schwankungen unterworfen (ADLER et al., 1995, 1997), (MUCK, 1989), (SPECKMANN, 1981), (RUSER, 1989).

Homofermentative MSB werden eingesetzt, um eine schnelle und energische Gärung einzuleiten. Eine starke Milchsäurebildung verbunden mit einem niedrigen pH-Wert zu Beginn der Silierung führt damit zu einer verbesserten Konservierung (WEINBERG et al., 1993). Bekannteste Vertreter zur Verhinderung von Fehlgärungen durch unerwünschte Bakterien sind *L. plantarum*, *Pediococcus cerevisiae*, *Enterococcus faecium*. Kommerziell erhältliche homofermentative Siliermittel enthalten oftmals eine Mischung unterschiedlicher Stämme.

2.1.6.1.2 Heterofermentative MSB

Die Fähigkeit, unter bestimmten Voraussetzungen neben Milchsäure auch andere Hauptstoffwechselprodukte bilden zu können, bleibt heterofermentativen MSB vorbehalten. Zu den fakultativ heterofermentativen MSB gehören z.B. *L. plantarum*, *L. pentosus*, *Pediococcus acidilactici*, *P. pentosaceus*, *Enterococcus faecium*. Obligate Heterofermenter sind z.B. *Lactobacillus brevis* und *Lactobacillus buchneri* (HAMMES, WEISS und HOLZAPFEL, 1992).

Lactobacillus buchneri:

Lactobacillus buchneri gehört zum natürlichen mikrobiellen Besatz auf Pflanzenmaterial DAESCHEL (1987), BECK (1987). DRIEHUS et al. (1999) und RANJIT (2002) ermitteln beim Einsatz von *L. buchneri* eine signifikante Abnahme der Hefenzahlen und führen dies auf die Bildung von Essigsäure und 1,2-Propandiol durch *L. buchneri* zurück. Für Mais und Sorghum ermittelte TABACCO et al. (2009) bei *L. buchneri* behandelten Silagen signifikant geringere Hefezahlen gegenüber den unbehandelten Kontrollsilagen. OUDE-ELFERINK et al. (1999), WEINBERG und MUCK (1996) nennen *L. buchneri* als Silageadditiv zur Verbesserung der aeroben Stabilität.

Die Bildung von Essigsäure erfolgt nach OUDE-ELFERINK et al. (2001) aus einer anaeroben Oxidation von 2 mol Lactat zu 1 mol Acetat und 1 mol 1,2-Propandiol (Abbildung 1). Eine Reihe von Literaturquellen weisen die Wirksamkeit von *L. buchneri*-Behandlungen, teilweise mit co-Inokulierung von *L. plantarum*, zur Verbesserung der aeroben Stabilität bei verschiedene Substrate nach

(WEINBERG und MUCK, 1996), (LINDGREN, 1985), (RANJIT, 2002), (FILYA, 2003), (KLEINSCHMIT, 2006). Die Verbesserung der aeroben Stabilität wird dabei im Wesentlichen auf die bessere Hemmwirkung von Essigsäure auf Hefen zurückgeführt (MOON, 1983).

ROUEL und WYSS (1994) konnten eine Verbesserung der aeroben Stabilität mit steigenden Essigsäuregehalten nachweisen. Mit einem Essigsäuregehalt von 0,8 % TM wurde eine aerobe Stabilität zwischen 3 und 7 Tagen erzielt, mit Essigsäuregehalten von über 1 % TM stieg die aerobe Stabilität auf über 10 Tage. HOLZER et al. (2003) können einen linearen Zusammenhang zwischen Essigsäuregehalt und aerober Stabilität herstellen.

Die Erzielung einer optimalen Wirkungssicherheit setzt eine ausreichende Dosierung des Siliermittels voraus. Nach WEINBERG und MUCK (1996) ist eine Dosierung in der Größenordnung von $1,0E+05 - 1,0E+06 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ Frischmasse ausreichend, um den natürlichen epiphytischen Besatz zu dominieren. KLEINSCHMIDT (2005) konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen der eingesetzten Impfmenge von *L. buchneri* und dem Essigsäuregehalt feststellen mit einem gleichzeitigen linearen Anstieg der aeroben Stabilität von 588 Std. auf 982,7 und > 760 Std. gegenüber einer Stabilität der Kontrolle von 376,7 Stunden.

RANJIT, KUNG & KLEINSCHMIT (2005) haben bei einer Applikationsrate von $< 2,5E+05 \text{ CFU/g FM}$ nur einen geringen Effekt gefunden.

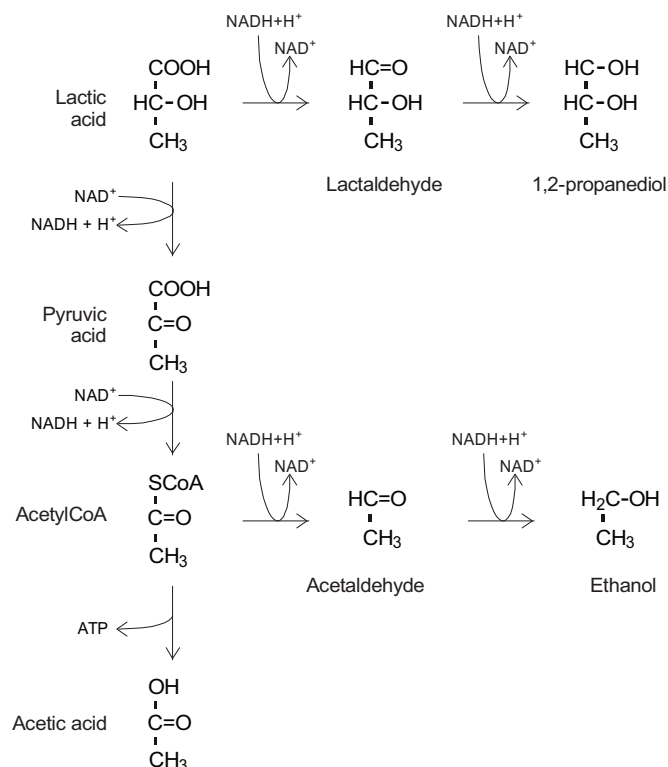


Abbildung 1 Anaerober Abbauweg von Milchsäure zu Essigsäure und 1,2-Propandiol durch *L. buchneri* (OUDE-ELFERINK et al., 1999)

Da es sich bei der Bildung von Essigsäure und 1,2-Propandiol aus Milchsäure um eine sekundäre Gärung handelt, ist für die Wirkungssicherheit eine ausreichende Lagerzeit unter anaeroben

Bedingungen des Silos vorzusehen. Untersuchungen von KLEINSCHMIT (2006) ermitteln bei 42 Tagen Silierung eine bessere aerobe Stabilität der behandelten Silage durch einen Anstieg des Essigsäuregehaltes und einer Reduzierung der Hefeanzahl. Hieraus folgert der Autor eine effizientere und gerichtete Silierung beim kombinierten Einsatz von homo- und heterofermentativen MSB (*L. buchneri* & *P. pentosaceus*). Produkthersteller fordern eine Lagerzeit von 6 – 8 Wochen.

Wie in Tabelle 4 dargestellt, führt der heterofermentative Gärungsweg beim Umbau von Glucose durch CO₂-Bildung zu erhöhten Trockenmasseverlusten bei einem gleichzeitig höheren Energiegehalt, wenn als Stoffwechselprodukte Milchsäure und Ethanol gebildet werden. Die Bestimmung der Fermentationsprodukte sowie der Trockenmasseverluste erfolgte hierbei mit einer Zuckerlösung und gibt für die heterofermentativen Gärungswege Trockenmasseverluste von 17% an (ROOKE & HATFIELD 2003). HOLZER et al. (2003) schätzen, dass 0,5 – 2,4% der Gärungsverluste durch heterofermentative Gärungswege erklärt werden können. Die Höhe der Trockenmasseverluste durch den Einsatz heterofermentativer Siliermittel werden in der Literatur in weiten Schwankungsbreiten angegeben.

Auf Grund der sekundären Gärung zeigen sich Trockenmasseverluste erst zu einem späteren Zeitpunkt der Silierung (DRIEHUS, 1999, 2001). DRIEHUS (1999) ermittelt in Silierversuchen bei einer rein heterofermentativen Silierung höhere Trockenmasseverluste gegenüber einem kombinierten Einsatz von homo- und heterofermentativen MSB. Die höheren Trockenmasseverluste zeigten sich ab Tag 14 bis Tag 90 einhergehend mit einer Bildung von Essigsäure und einem parallelen Anstieg des pH-Wertes.

FILYA (2003) zeigt für Mais und Sorghum signifikant höhere Trockenmasseverluste schon ab Tag 8 der Silierung, am Tag 90 für Maissilage Kontrolle 1,65% vers. 3,26% Behandlung und bei Sorghum 1,97% (Kontrolle) vers. 3,49% (Behandlung).

Nicht signifikante Abhängigkeiten der Trockenmasseverluste von Impfdosis und eingesetztem *L. buchneri*-Stamm finden sich bei KLEINSCHMIT et al. (2005). Eine Lagerung über 365 Tage führte hier zu höheren Verlusten bei der Kontrolle von 6,8% im Vergleich zur behandelten Silage von 5,1%.

DRIEHUS (2001) folgert aus höheren Trockenmasseverlusten bei geringeren Trockenmassegehalten während der Silierung eine gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit von *L. buchneri* bei niedrigeren Trockenmassegehalten gegenüber den ephiphytischen LAB sowie den co-inoculierten homofermentativen MSB.

KLEINSCHMIT & KUNG (2006) konnten durch Meta-Analyse von 43 Experimenten eine durchschnittliche Erhöhung der Trockenmasseverluste von 1,5% bei Einsatz von heterofermentativen MSB ermitteln und folgern, dass gegenüber der möglichen Verbesserung der aeroben Stabilität und den damit verbundenen Verlusten die Verluste während der Silierung gering sind.

Die parallel auftretenden Brutto-Energieverluste belaufen sich auf Grund der gebildeten energiereichen Stoffwechselprodukte (Ethanol, 1,2-Propandiol) auf unter 2% (PAHLOW, 2004).

2.1.6.2 Propionibakterien

Neben heterofermentativen MSB als biologische Siliermittel wurden von Lindgren auch Propionibakterien als Siliermittel vorgeschlagen (LINDGREN et al., 1983). Bisherige Ergebnisse ergeben kein eindeutiges Bild zum diesbezüglichen Einsatz von Propionibakterien (ROGER, 1999).

Untersuchungen von KUNG et al. (1998) zeigen eine positive Korrelation ($r^2=0,9$) zwischen Propionsäuregehalt und Dauer der aeroben Stabilität. NUSSBAUM (2005) konnte ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Propionsäuregehalt und Dauer der aeroben Stabilität von TMR nachweisen. LAMBERT & STRATFORD (1999) schließen auf eine antibakterielle Wirkung von Propionsäure. *Propionii acidipropionici* als Silageinoculant verbesserte die aerobe Stabilität von high moisture corn um 3 Tage (DAWSON et al., 1996). WEINBERG et al. (1995) ebenso wie HIGGINBOTHAM (1998) konnten demgegenüber keinen positiven Einfluss von Propionibakterien auf die aerobe Stabilität feststellen.

Die indifferenten Aussagen zur Wirksamkeit von Propionibakterien zur Verbesserung der aeroben Stabilität resultieren wahrscheinlich aus der geringen Konkurrenzkraft der Bakterien gegenüber dem epiphytisch vorkommenden Besatz. Die Bildung von Propionsäure nimmt ab einem pH-Wert von 4,8 stark ab, was zu einer Begrenzung der Wirksamkeit von Propionibakterien führt, da eine schnelle Ansäuerung unterhalb eines pH-Wertes von 4 bei leicht vergärbaren Substraten selten fehlt.

2.1.7 Aerober Verderb

Vollständiger Luftabschluss ist ein wesentlicher Parameter für eine erfolgreiche Silierung (McDONALD, 1991). Eine Minderung des Siliererfolges durch Luftsauerstoffeinfluss kann

- zu Beginn der Silierung durch zu lange Silierzeiten oder durch
- undichte oder nicht abgedeckte Silohaufen während der Silolagerung entstehen.

Lufteinfluss bei Öffnung und Auslagerung ist verfahrensbedingt nicht zu verhindern, aber durch angepasste Verfahrenstechniken zu minimieren.

Wie in den vorhergehenden Kapiteln dargestellt, sind Verluste durch verzögerte oder nicht vollständige Anaerobiose während der Silierung, nicht zu vermeiden. Am Anschnitt ist die Silage dem Luftsauerstoff verfahrensbedingt ausgesetzt. Eine Erwärmung am Anschnitt resultiert aus mikrobiellen Stoffwechselvorgängen die unter aeroben Bedingungen ablaufen. Besonders betroffen sind hiervon Maissilagen mit gut verfügbaren Nährstoffen SPIEKERS (2003).

Die Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit stellt eine Möglichkeit dar, Nacherwärmung am Anschnitt zu begrenzen. Es gilt dabei mit der Vorschubstrecke über der Lufteindringtiefe zu liegen. DLG-Empfehlungen sehen im Winter einen Vorschub von 1,5 m / Woche und 2,5 m / Woche im Sommer vor. Neuere Untersuchungen der Forschungs- und Lehranstalt Grub-Poing zeigen, dass der Vorschub mindestens 40 cm pro Tag (2,8 m / Woche) betragen sollte und dies unabhängig der Jahreszeit (RICHTER et al., 2009).

Die Verdichtung des Silos hat einen signifikanten Einfluss auf die Eindringtiefe des Luftsauerstoffs. Entnahmetechniken, die zu weitreichenden Auflockerungen im Silostock führen, fördern ebenfalls den Gasaustausch und beeinträchtigen so die aerobe Stabilität.

2.1.8 Verdichtung

Bei Auslagerung der Silage kann ein Einfluss des Luftsauerstoffs verfahrensbedingt nicht verhindert werden. Forderungen nach einer hohen Verdichtung erfolgen aus der Notwendigkeit der Begrenzung der Eindringtiefe von Luftsauerstoff am Anschnitt der Silage (O'KIELY, 1989). Verantwortlich für den Lufteintrag in den Silo sind Luftdruck und Diffusionsprozesse (McGECHAN & WILLAMS, 1994). Auf Grund der unterschiedlichen spezifischen Dichten von CO_2 und der Umgebungsluft kommt es zur „ CO_2 -Pumpe am Anschnitt“, die eigentliche Ursache des Gasaustausches im Silo HONIG (1991). Unter Festlegung einer akzeptablen Gasaustauschrate von $20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Stunde}^{-1}$ leitet HONIG eine minimale Verdichtung von 250 bis $300 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ ab. Parsons (1991) berechnet, auf Grundlage der Dichteunterschiede zwischen Kohlendioxid im Silo und der umgebenden Luft, eine Eindringtiefe von bis zu 4 Metern in den Silostock bei Auslagerung.

Eindringtiefen der Luft in Abhängigkeit der Lagerungsdichte am Anschnitt sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei steigender Lagerungsdichte verringert sich die Eindringtiefe der Luft.

Tabelle 8 Eindringtiefe der Luft an der Anschnittfläche von Silagen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte nach LOSAND (2003)

Lagerungsdichte [kg TM/ m ³]	Eindringtiefe der Luft [cm]
120	50 bis 100
150	45 bis 80
180	30 bis 60
210	25 bis 40
240	20 bis 60
270	15 bis 20

Die erzielbare Verdichtung im Praxissilo ist abhängig vom Pflanzenmaterial, der geometrischen Form des Silos sowie der verfahrenstechnischen Durchführung.

Die Verdichtungsfähigkeit verschlechtert sich, nach MILTNER & RATH (1998) sowie EDER (1998), mit fortschreitender Abreife der Restpflanze drastisch. Der mit der Abreife einhergehende Anstieg des Rohfasergehaltes hat nach DERNEDDE (1983) einen deutlichen Effekt auf die Verdichtbarkeit. Kürzere Häcksellängen tragen in der Praxis zur leichteren Verdichtbarkeit des Futters bei (BUCHGRABER et al., 1994), (WOOLFORD, 1984), (WILHELM, 1991).

Bei ausgewählten Häcksellängen von 5,5, 14,0 und 21,0 mm zeigten Laborsilagen eine aerobe Stabilität zwischen 0,6 und 2,5 Tagen ohne eine gerichtete Abhängigkeit der Häcksellänge LEURS

(2005). Verfahrenstechnische Einflüsse auf die Verdichtung konnten von der Autorin durch Laboruntersuchungen dargestellt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass es innerhalb der ersten 60 sec zu einer Rückfederung bei der Verdichtungsarbeit kommt, wobei die Rückfederung positiv korreliert ist mit steigender Häcksellänge. Geringere Verdichtungen bei größerer Häcksellänge (22 mm) gegenüber einer Häcksellänge von 7 mm werden von THAYSEN et al. (2006) bestätigt, wobei der Einfluss der Häcksellänge im Kantenbereich und in der oberen Silohälfte deutlicher hervortritt als im unteren Bereich.

Untersuchungen der Dichte in 134 Praxissilos wurde von der Arbeitsgruppe Grub-Poing/Weihenstephan im Rahmen des Projektes Controlling am Silo durchgeführt. Die Verdichtung an verschiedenen Stellen des Anschnitts wurde mittels Probedröher bestimmt. Die Ergebnisse zeigen eine große Streuung und haben nur geringe Beziehung zum Trockenmassegehalt. Die in der oberen und mittleren Schicht realisierten Verdichtungen von $219 \pm 48 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ (oben) und $273 \pm 41 \text{ kg TM} \cdot \text{m}^{-3}$ (Mitte) lagen unter den nach DLG geforderten Werten. Die gewünschte Verdichtung wurde in den meisten Silos nur im unteren Teil erreicht (RICHTER, 2009).

Praxiserhebungen von THAYSEN et al. (2006) zeigen ebenfalls, die in vielen Fällen, unzureichende Verdichtung. In Untersuchungen von 210 Praxissilagen (Mais- und Grassilagen) erreichten mehr als die Hälfte der Silagen nicht die nach DLG geforderte Verdichtung. Die Verdichtung streute innerhalb der 123 untersuchten Maissilageproben sehr stark. Durch entsprechende Verdichtungsarbeit konnte aber auch bei hohen Trockenmassegehalten die Sollverdichtung erreicht werden. Ein Vergleich der Verdichtung in der Mitte und im Randbereich von 20 Silos bestätigte die Erwartung, dass im Silokern höhere Verdichtungen erzielt werden können. Im Randbereich wurden Abweichungen von 12 – 16% zur Verdichtung in der Silomitte gemessen (Tabelle 9.)

Tabelle 9 Unterschiede in der Verdichtung im Silo (n=20 Silos) nach Thaysen et al. (2006)

	Silomitte (kg TM/m ³)	Silorand (kg TM/m ³)
Oben	175	146 (-16%)
Mitte	203	175 (-14%)
Unten	211	185 (-12%)

Empfehlungen der DLG, zur Erzielung einer optimalen Verdichtung im Silo, fordern ein Mindestwalzgewicht auf dem Silo in Höhe eines Viertels der stündlichen Ernteleistung. Die einzubauende Schichtdicke soll höchstens 20 – 30 cm betragen. Auf Grund der stetig steigenden Bergeleistung der Erntefahrzeuge verbunden mit hohen Erntemengen bei der Biogaserzeugung werden derzeitige Faustzahlen zur Siliertechnik kritisch gesehen. LATSCH (2008) folgert, dass Verdichtungsformeln bei zunehmenden Durchsatzleistungen der Erntemaschinen nicht mehr aktuell sind. Eine Erhöhung der Verdichtungsleistung durch den Einsatz von Vibrationswalzen, Raupenfahrzeugen sowie Waggonrädern werden derzeit untersucht und zeigen erste positive Ergebnisse bei der Silierung großer Erntemengen (THAYSEN, 2009).

Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Verdichtbarkeit des Silostocks hat die Silogeometrie. Untersuchungen der Landwirtschaftskammer NRW zeigen, dass die Verdichtung von Silagen in Silos mit Seitenwänden besser ist als ohne (BEEKER, 2003). Freigärhaufen, die nach der Progressive-Wedge-Methode aufgefahren werden, erzielen gerade in den Randbereichen nur geringe Verdichtungsgrade. In Rand- und Deckschichten ermitteln ASHBELL und LISKERS (1988) Verluste in Höhe von 10 – 15%. Der Einsatz von Baggern zur Kantenverdichtung wird derzeit geprüft und zeigen erste gute Ergebnisse (THAYSEN, 2009).

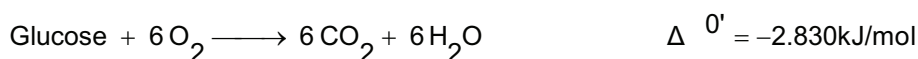
2.1.9 Temperaturentwicklung

Aerober Verderb von Silage unter Luftsauerstoffeinfluss ist unausweichlich WOOLFORD (1990) ASHBELL und LISKERS (1988) WEINBERG et al. (1993) und wurde bei einem großen Spektrum unterschiedlicher Silagematerialien ermittelt.

Auslöser des Verderbs sind Mikroorganismen in der Silage, die während der Silierung durch die vorherrschenden Umweltbedingungen in der Silage (Anaerobiose, niedriger pH-Wert), an ihren Stoffwechselvorgängen gehindert wurden. In Gegenwart von Luftsauerstoff können diese wieder organische Verbindungen oxidieren (WOOLFORD, 1978).

Die Fixierung des organischen Kohlenstoffes als CO_2 erfolgt durch respiratorische Stoffwechselvorgänge und ist mit einem Temperaturanstieg verbunden (WOOLFORD, 1978). In Gegenwart von Luftsauerstoff erfolgt der Abbau organischer Substanzen durch Oxidation. Unter Annahme einer vollständigen Mineralisation erfolgt der Abbau von Glucose durch Sauerstoffzehrung sowie CO_2 - und H_2O -Bildung und ist für Mikroorganismen mit einem Energiegewinn von $2.830 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ Glucose verbunden (Formel 4).

Formel 4 Respirationsgleichung von Glucose SCHLEGEL (2007)



Abgeleitet aus Formel 4 ergeben sich 3 Hauptmethoden, um die aerobe Stabilität zu bestimmen (HONIG 1986):

- a) Messung der CO_2 -Produktion entweder durch Absorption, empfohlen für kleine Probemengen, oder durch Messung des CO_2 -Gehaltes. Diese Bestimmung ist nahezu identisch mit den direkten Trockenmasseverlusten, da die Verluste durch die Respirationsformel an die CO_2 -Produktion gekoppelt sind.
- b) Messung der Sauerstoffzehrung im so genannten „Sapromat“, ein Testsystem zur Bestimmung der Sauerstoffzehrung von Klärschlamm. Üblicherweise werden nur kleine Probemengen untersucht und mögliche Temperatureinflüsse werden vernachlässigt. Wieder ist der Trockenmasseverlust über die Respirationsformel mit der Sauerstoffzehrung verbunden.

- c) Messung der Temperaturentwicklung, da die aerobe Mineralisation ein exothermer Prozess ist. In großen Massen kommt es durch die isolierende Wirkung der Silage zu einer Temperaturakkumulation. Werden kleine Probenmengen untersucht, muss der Temperaturabfluss über die Umgebungsluft mit einer künstlichen Isolierung verhindert werden. Unter standardisierten Messbedingungen ist eine Übertragbarkeit der Temperaturentwicklung auf die entstandenen Trockenmasseverluste möglich.

Die Messung der CO₂-Bildung wird bei der Bestimmung der Lagerstabilität von Getreide eingesetzt. Die Messung der Sauerstoffzehrung wird im Abfall- und Abwasserbereich mittels des BSB (biologischer Sauerstoff Bedarf) ermittelt und gibt Auskunft über die biologische Verfügbarkeit der organischen Fraktion (DIN-38409 Teil 51).

Die messtechnisch einfach zu realisierende Temperaturbestimmung des Probegutes unter Luftsauerstofflagerung ist Grundlage des Systems „Völkenrode“. Die Berechnung der Trockenmasseverluste erfolgt aus dem linearen Zusammenhang der Temperaturerhöhung und der CO₂-Produktion sowie dem stöchiometrischen Zusammenhang zwischen CO₂-Bildung und Trockenmasseverlusten. Der zu berücksichtigende Konversionsfaktor gilt nur für den im System „Völkenrode“ vorgeschlagenen Versuchsaufbau und korrigiert den Einfluss unterschiedlicher Trockenmassegehalte respektive Wassergehalte und damit die Wärmekapazität sowie Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Silagen. Im Rahmen der DLG Wirksamkeitsuntersuchung von Siliermitteln der Wirkungsrichtung 2 „Verbesserung der aeroben Stabilität“ ist die Methodik anerkannt.

Mit dem Testsystem kann die aerobe Stabilität sowie der Trockenmasseverlust durch Nacherwärmung bestimmt werden. Geschwindigkeit und Höhe des Verderbs determinieren sich aus einem Zusammenspiel zwischen physikalischen, chemischen und mikrobiellen Faktoren OHYAMA et al. (1975). Der Zeitraum, den eine Silage bei Lagerung unter Luftsauerstoff ohne erkennbare Nacherwärmung verbringt, wird als aerobe Stabilität bezeichnet und in Stunden oder Tagen ausgedrückt. Verschiedene Autoren setzen hierbei unterschiedliche Grenzwerte an. Im Rahmen der DLG Prüfrichtlinie werden Silagen mit einem Temperaturanstieg von 3°C über Umgebungstemperatur als aerob instabil charakterisiert (DLG, 2006).

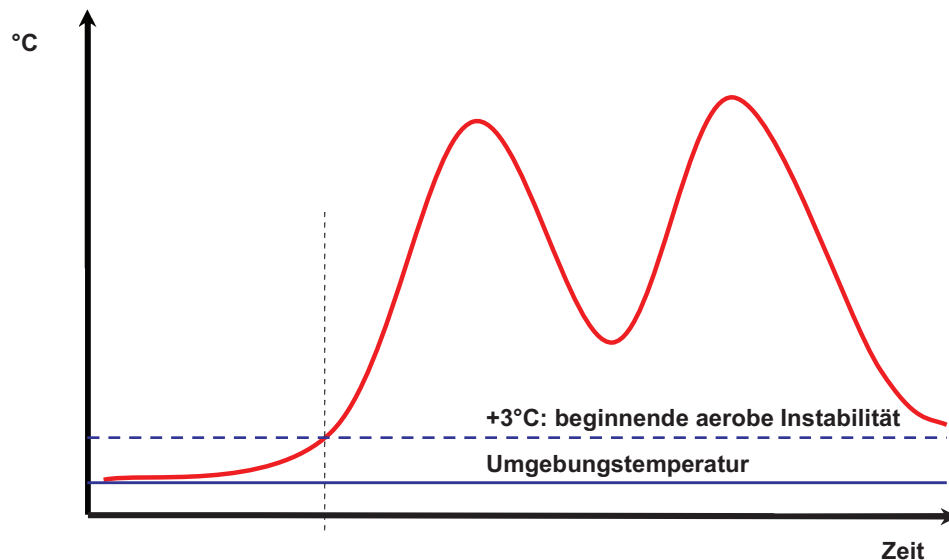


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Temperaturverlaufes unter Luftsauerstoffeinfluss im HONIG-Test

Eine schematische Darstellung der Temperaturentwicklung unter aeroben Bedingungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Zeitraum bis zum Anstieg der Temperatur ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig, die nachfolgend diskutiert werden. Die Ausbildung von zwei lokalen Temperaturmaxima wird von verschiedenen Autoren beschrieben (WOOLFORD, 1977), (MARTENS, 2006), (TABACCO, 2009).

Die Ausprägung der Temperaturerhöhung ist von Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit des Substrates sowie der Substratmenge abhängig und kann im Silostock deutlich höher ausfallen als im Laborversuch (HONIG, 1999). Die in Abbildung 2 angedeutete höhere Temperaturaussprägung im Maximum 2 ist nicht immer zu beobachten.

Aus Untersuchungen zur Kompostierung ist bekannt, dass es im Verlauf der aeroben Umsetzung zu Verschiebungen in der mikrobiellen Population kommt. Einen Anstieg der Hefepopulation kurz vor Beginn der Temperaturerwärmung wurde von DRIEHUS (2009) bei Untersuchungen von Mais und Grassilage ermittelt. Der Hefenbesatz vor Erwärmung von ca. $1,9 \times 10^5$ stieg innerhalb von zwei Tagen auf $6,6 \times 10^7$ und blieb über das erste Maximum hinaus konstant. Erst nach dem ersten Temperaturmaximum stieg die Zahl der Sporenbildner an. Dies deckt sich ebenfalls mit Untersuchungen von TABACCO (2009) der einen Anstieg der Temperatur ab einem Hefenbesatz von $1,0 \times 10^5$ ermittelt und ebenfalls mit steigenden Temperaturen einen Anstieg der Clostridien Sporen feststellt.

JONSSON und PAHLOW (1989) ermitteln eine abnehmende Hefezahl bei Überschreitung einer Temperatur von 40°C während der aeroben Nacherwärmung. Ähnliche mikrobielle Verschiebungen werden bei der Kompostierung von organischen Stoffen berichtet, mit steigenden Temperaturen werden mesophile Bakteriengruppen von thermophilen Arten verdrängt.

2.1.10 Mikroorganismen

2.1.10.1 Hefen

Hefen stellen eine Gruppe der autochthon vorkommenden Pflanzenmikroorganismen dar (ENDO, 1955). Der Einfluss von Hefen auf die aerobe Stabilität wurde von BECK & GROSS (1964) untersucht. Die Autoren weisen Hefen eine große Bedeutung beim aeroben Verderb zu. Wegen der Möglichkeit, organische Säuren zu verstoffwechseln, gelten Hefen als Auslöser der Nacherwärmung und einer damit einhergehenden Senkung des Energiegehaltes der Silage (ZIMMER, 1993). Eine gegenläufige Korrelation ($R^2 = -0,79$) zwischen aerober Stabilität und Anzahl der Hefen ermittelt (KUNG, 1998). Mit steigender Hefenanzahl verringerte sich die aerobe Stabilität (Abbildung 3). O'KIELY & MUCK konnten ebenfalls eine Korrelation zwischen Erwärmung und Hefenentwicklung ermitteln (O'KIELY et al., 1992).

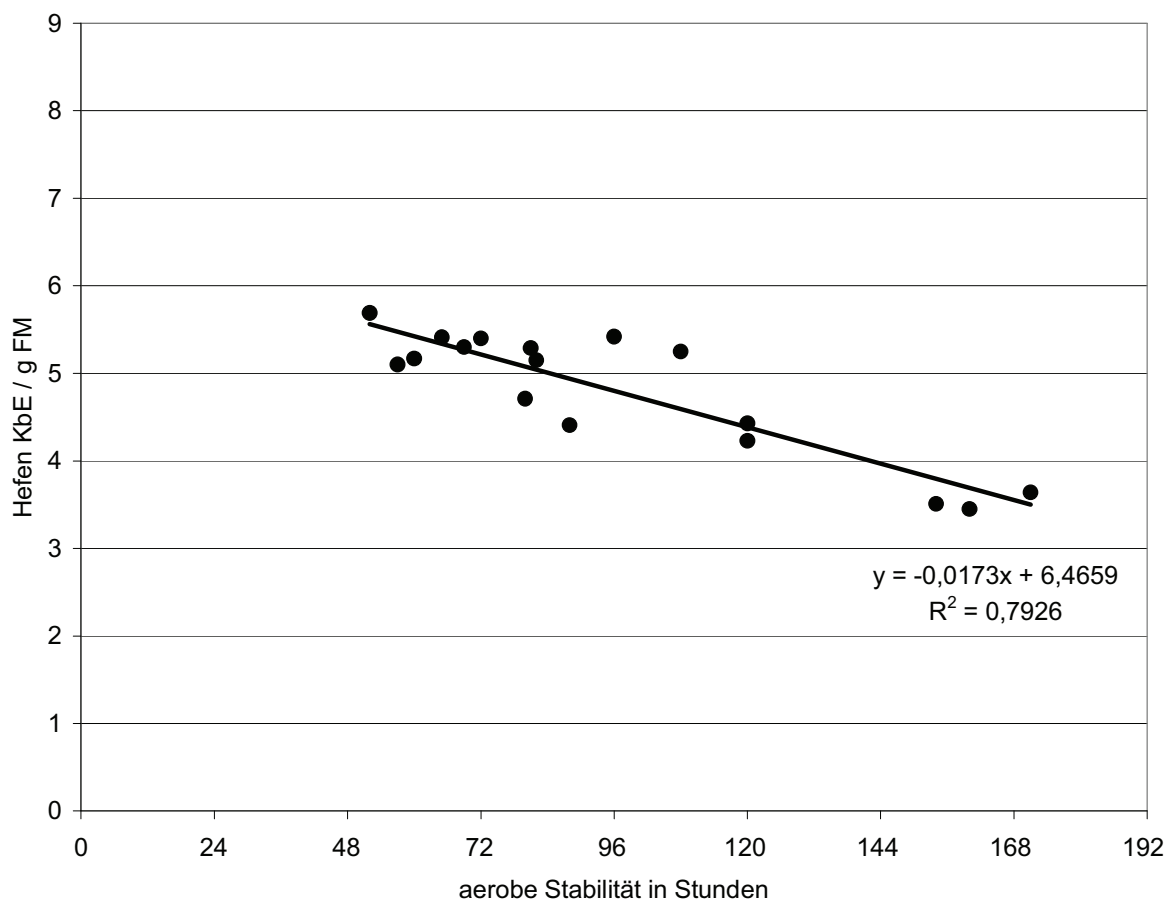


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Hefekeimbefall und aerober Stabilität der Maissilage nach KUNG (1998)

DANIEL & O'LEARY ermittelten einen beschleunigten aeroben Verderb bei Hefezahlen $>10^5$ KbE \cdot g $^{-1}$ FM DANIEL (1970), O'LEARY et al. (1981). Geringere Hefezahlen schützen aber nicht vor aerobem Verderb (BECK, 1975), (OHYAMA et al., 1975), (HENDERSON et al., 1975), (WOOLFORD et al., 1977, 1978).

Die in Silagen gefundene Hefenflora setzt sich aus den verschiedenen Gattungen *Candida*, *Pichia* (= *Hansenula*), *Saccharomyces* und *Torulopsis* zusammen (JONSSON & PAHLOW, 1989). Der hefeähnliche Pilz (z.B. *Candida* ssp.) unterscheidet sich in der Art der Vermehrung durch ein Pseudohyphenwachstum vom echten einzelligen Hefepilz (z.B. *Saccharomyces cerevisiae*), der sich durch Sprossung vermehrt (SCHLEGEL, 2007). Auf Grund seiner bauklötzchenartigen Morphologie kann *Candida* bei der Hefebestimmung leicht identifiziert werden.

Die Entwicklung des Hefenbesatzes in Silagen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Auf der Pflanze können Hefen unterhalb der Nachweisgrenze liegen, aber bei Ernte innerhalb von einem Tag eine Populationsdichte von $1,0E+04 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ erreichen (MERRY, 1995). Der epiphytische Besatz an Hefen setzt sich aus den nicht fermentierenden Gattungen *Sporobolomyces*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula* und *Torulopsis* zusammen (McDONALD, 1991), (LINDGREN et al., 1985), (MIDDLEHOVEN, 1986). Durch Ausbildung anaerober Bedingungen in der Silage erfolgt eine Verschiebung des epiphytischen Besatzes zu fermentierenden Hefen (MIDDLEHOVEN & Van BAALEN, 1988).

In fermentierten Silagen ermittelte HENDERSON (1972) Hefezahlen zwischen $1,0E+03 - 1,0E+06 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$. PAHLOW (1985) konnte in Silierversuchen einen Anstieg der Hefekonzentration bei Lufteinfluss während der Lagerung feststellen. Eine gasdichte Lagerung zeigte eine schnelle Reduzierung der Hefezahlen bis unterhalb der Nachweisgrenze. Mit fortschreitender Lagerdauer kam es ab Tag 60 wieder zu einem Anstieg der Konzentration. Bei Lufteinfluss kam es kurzfristig zu einer Reduktion der Hefenzahl, die aber mit längerer Lagerdauer auf einen Wert höher als der Ausgangsbesatz anstieg (Abbildung 4).

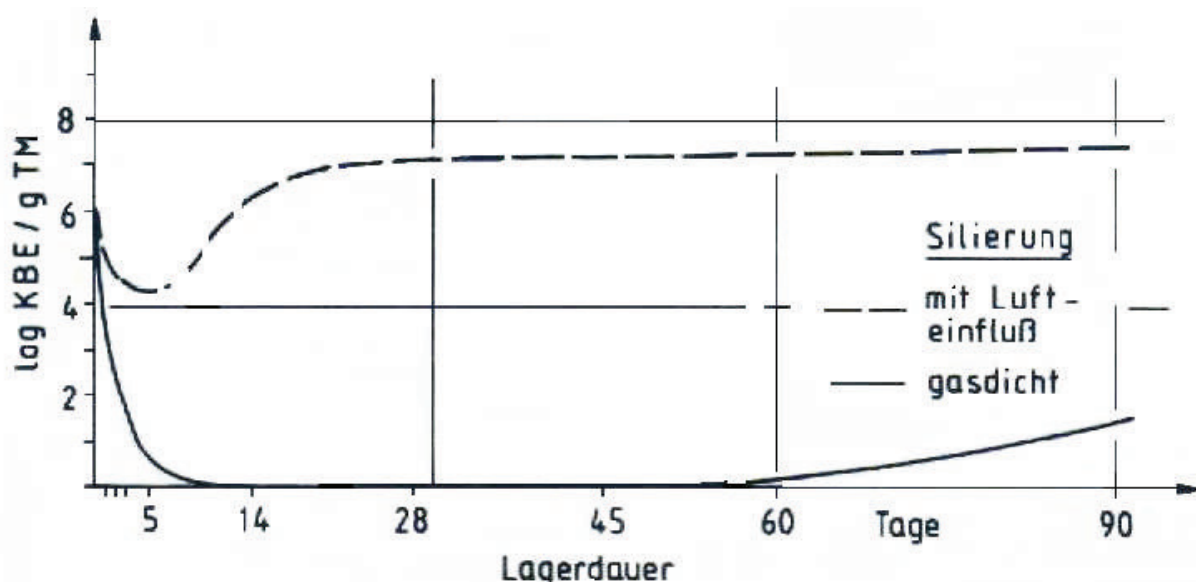


Abbildung 4 Auswirkungen von Lufteinfluss während der Lagerung auf die Hefeentwicklung in Silagen; Quelle Pahlow 1985

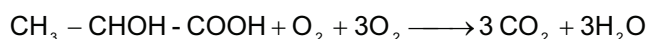
Angaben zu Wachstumsbedingungen und Wachstumsoptima von Hefen werden innerhalb der Literatur variierend diskutiert. Nach WOOLFORD (1976) kann in Silagen mit pH-Werten von 3 – 8 ein

Hefenwachstum beobachtet werden, wobei das Wachstumsoptimum nach WOOLFORD (1975) zwischen 3,5 – 6 liegt. WALKER (1998) ermittelte für verschiedene Hefen pH-Wert-Grenzen, die in Abhängigkeit von verschiedenen Säuren differierten. WOOLFORD (1975) stellt hierzu fest, dass Hefen unter aeroben Bedingungen organische Säuren besser vertragen als andere Mikroorganismen. Ein weites pH-Wert-Fenster von 2,0 – 12,4 konnte für das Wachstum von *Pichia anomala* beobachtet werden (FREDLUND, 2004).

Nach SILIKER (1981) zitiert in JONSSON (1989) reagieren Hefen empfindlich auf hohe Temperaturen. Jonsson berichtet ebenfalls, dass Hefezahlen bei Temperaturüberschreitung von 40°C bei aerober Nacherwärmung abnehmen. Temperaturoptima für verschiedene Hefestämme liegen nach Di MENNA (1981) zwischen 20 – 40°C. Für den *Pichia anomala* strain K konnte über einen Temperaturbereich von 5 – 25°C kombiniert mit einer Wasseraktivität von 0,89 – 0,98 ein Wachstum nachgewiesen werden. Hierbei führte eine abnehmende Temperatur und ein sinkender a_w -Wert zu einer Verzögerung des Wachstums (LAHLALI, 2008).

Als fakultative Aerobier sind Hefen sowohl zu respiratorischem Stoffwechsel als auch zu fermentativem Stoffwechsel in der Lage. Das Substratspektrum reicht von verschiedenen Zuckern bis hin zu organischen Säuren. Eine Einteilung der Hefen in Säure-Verwerter (*Candida*, *Endomycopsis*, *Pichia*) und Zucker-Verwerter (*Torulopsis*) wurde von BECK et al. (1964) und JONSSON & PAHLOW (1989) vorgenommen. MIDDELHOVE & FRANTZEN (1986) konnten auch bei nicht Milchsäure verbrauchenden Hefen (non-lactate assimilating yeasts) nachweisen, dass diese Milchsäure, unter bestimmten Voraussetzungen, umsetzen und fordern, dass eine Unterteilung nach lactat oder non-lactat utilizer nicht vorgenommen werden sollte. Ebenso zeigten sich bei den Untersuchungen von Middelhove & Frantzen pH-Wert-abhängige Stoffwechselwege und Abbauraten. Sanderson demonstrierte den Abbau von Milchsäure durch *Candida* spp. SANDERSON (1993). Der Abbau von Milchsäure durch Hefen erfolgt nach Formel 5.

Formel 5 Oxidation von Milchsäure durch Hefen nach ROOKE & HATFIELD (2003)



Glucose als Substrat kann von allen Hefen umgesetzt werden (BARNETT et al., 2000). Dies ist insbesondere bei Silagen mit hohen Restzuckergehalten problematisch, wie sie bei einer überwiegend homofermentativen Silierung auftreten können.

Umfangreiche Versuche zur Auswirkung von verschiedenen Wachstumsbedingungen auf Silagemikroorganismen und deren Rolle bei aerobem Verderb führte MARTENS (2006) in geschüttelten Batch-Kulturen durch. Hohe Gehalte an Milchsäure und niedrige pH-Werte ermöglichten *Issatchenkia orientalis* (*Candida crusei*) und *Pichia anomala* hohe Abbauraten von Lactat. *Saccharomyces cerevisiae* hingegen zeigte unabhängig vom pH-Wert keinen Abbau von Lactat. Ebenfalls keinen Einfluss auf den Stoffwechsel von *Saccharomyces* hatte der pH-Wert laut NARENDRANATH (2005), wohingegen mit steigendem Anteil von wasserlöslichen Kohlenhydraten die spezifische Wachstumsrate zunahm.

Untersuchungen mit antimykotischen und antibakteriellen Mitteln zeigten, dass der Milchsäureabbau und pH-Wert-Anstieg, beim aeroben Verderb durch Hefen ausgelöst wird. Martens sieht in der pH-Wert-abhängigen Milchsäureassimilation einen Grund, warum homofermentativ behandelte Silagen schneller aerob verderben (MARTENS, 2006). FILYA et al. (2000) berichten ebenfalls, dass hohe Milchsäuregehalte in Zusammenhang mit homofermentativer Siliermittelbehandlung als Substrat für Milchsäure verwertende Hefen dienen können.

Essigsäure als Kohlenstoffquelle kann von *Pichia anomala* ebenfalls als Substrat genutzt werden. Bei einem Essigsäuregehalt von 0,1% (w/v) konnte *P. anomala* Essigsäure als einzige Kohlenstoffquelle nutzen, bei 0,25 (% w/v) war das Wachstum inhibiert. In Gegenwart von Glucose war das Wachstum auch bei 0,25 (% w/v) Essigsäure nicht eingeschränkt (FREDLUND, 2004).

Die Zugabe von 1,2-Propandiol sowie gepufferter oder ungepufferter Essigsäure in variierenden Konzentrationen führte bei MAYRHUBER (2001) ebenfalls zu einer positiven Korrelation zwischen steigender Konzentration an Essigsäure und aerober Stabilität.

MOON (1983) deutet aus Wachstumsversuchen mit Acetat und Propionat, dass Wachstumsdepressionen bei Acetatzugabe aus Energieverbrauch durch aktiven Zelltransport zur Absenkung der intrazellulären Acetatkonzentration resultieren, die hemmende Wirkung von Propionat aber aus anderen Wirkungsmechanismen resultieren. PIPER (2001) stellt hierzu fest, dass *S. cerevisiae* Acetat aktiv durch ATP-hydrolysierenden Transport aus den Zellen transportieren (ABC-Transporter).

Die singuläre Betrachtung einzelner Parameter zur Determinierung der Überlebensfähigkeit von Organismen reicht nicht aus. Die Kombination verschiedener Umwelteinflüsse kann die Überlebensfähigkeit stark herabsetzen oder die Wirkung einzelner Einflussfaktoren begrenzen. Ebenfalls können Organismen zur Aufrechterhaltung der Energiegewinnung ihre Stoffwechselvorgänge den Umweltbedingungen anpassen. Unter Berücksichtigung von Literatur- und Praxisergebnissen muss festgestellt werden, dass Silagen optimale Lebensbedingungen für Hefen bieten, oder sie zumindest nicht im großen Maße einschränken. Zu hohe Gehalte an Hefen und Pilzen stellt KALZENDORF (2007) vor allem in leicht silierbaren Futtermaterialien wie Mais oder in Feuchtkonzentratfuttermitteln im Rahmen einer Untersuchung von 200 Futterproben fest. Bei 25,7% aller untersuchten Proben wurde ein allgemeiner Hefebesatz mit $> 1,05E+06 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ gefunden, in 44,3% aller untersuchten Maissilagen lactatfermentierende Hefen mit einem Keimbesatz von $> 1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$.

Ein hoher Hefebesatz sowohl auf Frischmaisproben als auch in Silagen wurde im Rahmen der Praxiserhebung zur Problematik der Nacherwärmung seitens der LWK Bonn festgestellt. Jede zweite Frischmaisprobe wies einen Hefebesatz oberhalb der kritischen Grenze von $1,0E+04 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ Erntegut auf. Nicht immer führte dies zu einem hohen Hefebesatz in der Silage und damit zur Nacherwärmung. In 77% der Silageproben wurde aber ein Hefebesatz oberhalb der kritischen Marke von $1,0E+04 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ Siliergut festgestellt. Im Mittel enthielten nitratarmer Silagen 10mal soviel Hefen wie Silomaisproben mit Gehalten über 500 mg Nitrat/kg TM.

Von der European Feed Microbiology Organisation (EFMO) wird als Orientierungswert $1,0\text{E}+06 \text{ KbE} \bullet \text{g}^{-1} \text{ FM}$ für Hefen als verderbanzeigend vorgeschlagen (CHUDASKE, 2006).

Die Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) nimmt eine Qualitätseinteilung für Biertreber nach Hefebesatz und Schimmelbefall vor LfL (2008):

Schwellenwert für Hefen $1,0\text{E}+08 \text{ KBE KbE} \bullet \text{g}^{-1} \text{ FM}$

Qualitätsgemindert: Schimmel $> 3 \times 10^4 \text{ KbE} \bullet \text{g}^{-1} \text{ FM}$

Verdorben: Schimmel $> 2 \times 10^5 \text{ KbE} \bullet \text{g}^{-1} \text{ FM}$

Als verderbanzeigende Indikatoren für die Praxis empfehlen VISSERS et al. (2007) folgende Parameter und Grenzwerte:

- Konzentration Hefen & Pilze $> 1,0\text{E}+05 \text{ KbE} \bullet \text{g}^{-1} \text{ FM}$
- Temperaturerhöhung $> 5^\circ\text{C}$
- pH der Probe größer als 4,4 (minimaler pH-Wert für das Wachstum von *Clostridium tyrobutyricum* (THYLIN et al., 1995))

2.1.10.2 Pilze

Pilze sind eukaryotische Mikroorganismen. Typische Vertreter in Silagen sind *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Byssoschlamys*, *Absidia*, *Arthrimum*, *Geotrichium*, *Monascus*, *Scopulariopsis* und *Trichoderma* (PELHATE (1977), WOOLFORD (1984)). Da Schimmelpilze nach REISS (1986) obligate Aerobier sind, kommt der Gaszusammensetzung im Silostock eine maßgebliche Bedeutung zur Pilzentwicklung zu. SCHMERBAUCH (2000) schließt aus Literaturrecherchen, dass Kohlendioxid als Schutzgas gegen Pilzwachstum und Toxinbildung eine bedeutende Rolle spielt und in möglichst hoher Konzentration, während der gesamten Lagerung von Silagen im Horizontalsilo bzw. in Ballensilage, zu halten ist. Unzureichende Verdichtung, vor allem bei grob strukturiertem Pflanzenmaterial und hohem Trockenmassegehalt bzw. hohem Anwelkgrad, machen Silage anfälliger gegenüber einer stärkeren Verpilzung (ADLER & LEW, 1995), (BUCHGRABER et al., 1994).

Pilze haben nur eine geringe Wirkung auf den Beginn des aeroben Verderbs. Eine Ausnahme stellt *Penicillium roqueforti* dar, der auch Milchsäure als Kohlenstoffquelle nutzen kann (PAHLOW, 2005).

In 89% der untersuchten Silageproben mit sichtbarem Pilzbefall dominierte *Penicillium roqueforti*.

Neben der Herabsetzung des Energiegehaltes und der Schmackhaftigkeit der Silage können Pilze Mykotoxine bilden, die sich negativ auf die Tiergesundheit auswirken (AUERBACH, 1996). Die Auswirkung von verschimmelter Silage auf den Biogasprozess wird kontrovers diskutiert ohne Hinterlegung konkreter Ergebnisse. Mögliche hemmende Einflüsse durch Mykotoxine können nicht ausgeschlossen werden, woraus für die Praxis die Empfehlung abgeleitet werden muss, auf den Einsatz verschimmelter Silage zu verzichten.

2.1.10.3 Acetobacter

Essigsäurebakterien sind obligat aerobe, säuretolerante Bakterien. Die bis heute aus Silagen identifizierten Essigsäurebakterien gehören zum Genus *Acetobacter* (SPOELSTRA et al., 1988). Essigsäurebakterien sind in der Lage organische Säuren zu CO₂ und Wasser zu verstoffwechseln und werden damit zu den verderbauslösenden Mikroorganismen gezählt. Durch Unterdrückung des Hefenwachstums mittels antimykotischer Mittel konnten WOOLFORD et al. (1977) nachweisen, dass Bakterien an aeroben Umsetzungen beteiligt sind und diese auch auslösen können.

NISHINO (2009) hingegen isolierte aus Silagen Stämme von *Acetobacter pasteurianus*. Silagen, die mit diesen Stämmen inoculiert wurden, zeigten höhere Essigsäuregehalte hieraus folgert der Autor, dass aerobe *Acetobacter* die anaeroben Bedingungen der Silage tolerieren und das Gärsäuremuster beeinflussen können.

2.1.11 Zusammenfassung Silierung

Die Silierung von feuchtem Erntematerial ist eine etablierte Konservierungsform die, im landwirtschaftlichen Bereich, vielfach eingesetzt wird. Derzeitige Verfahrensweisen und Erfahrungswerte der Silagebereitung spiegeln die Größe des Tierbestandes und der damit verbundenen erforderlichen Silagemenge wieder. Die heute in Deutschland üblichen Biogasanlagen setzen ein Vielfaches dessen um. Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung stellt die Nacherwärmung eine wesentliche Verlustquelle dar.

Ein vollständiger und schneller Luftabschluss, durch eine kurze Füllzeit des Silos, ist eine wesentliche Forderung für eine verlustarme Konservierung. Auch unter Berücksichtigung steigender Bergeleistung der Erntefahrzeuge, führen die benötigten Substratmengen landwirtschaftlicher Biogasanlagen, zu Ernte- und Silierzeiträumen von mehreren Tagen. Der hierdurch verzögerte vollständige Luftabschluss erhöht die Gefahr der unkontrollierten Vermehrung von Gärschädlingen im Silostock. Eine starke Vermehrung von Hefen, schon zu Beginn der Silierung, führt zu Silagen, die bei Auslagerung verstärkt zu Nacherwärmung neigen.

Umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss verfahrenstechnischer Parameter (Verdichtung, Häcksellänge, etc.) zeigen, dass die Verdichtung im Silostock in der Praxis nicht ausreichend ist, um die Eindringtiefe von Luftsauerstoff ausreichend zu begrenzen und Nacherwärmung zu verhindern.

Die unzureichende aerobe Stabilität, gerade von Maissilagen mit einem hohen Energiegehalt, ist in der Literatur vielfach dokumentiert. Untersuchungen zur Auswirkung der Nacherwärmung auf die Methanausbeute stehen noch aus.

Heterofermentative Siliermittel können die aerobe Stabilität verbessern. Wesentliches Argument für die Verbesserung ist die Erhöhung des Essigsäuregehaltes der Silage. Ergebnisse zum Verhalten von Silagen mit und ohne Siliermitteleinsatz unter Luftstress sind im Kontext der Biogaserzeugung bis dato nur unzureichend vorhanden.

Als Hauptkritikpunkt der heterofermentativen Silierung werden die, gegenüber der homofermentativen Silierung, erhöhten Gärgasverluste angeführt. Unter Berücksichtigung der Bildung energiereicher Stoffwechselprodukte werden die Bruttoenergieverluste auf unter 2 % geschätzt. Aussagekräftige Vergleichsuntersuchungen zum Einfluss der Silierung unter Berücksichtigung von Silierverlusten und aerober Exposition auf den Methanertrag liegen nicht vor.

2.2 Prozessschritte der Biogasgestehung

2.2.1 Biologie der Biogasgestehung

Vergärung ist der Abbau komplexer organischer Verbindungen durch ein Zusammenspiel verschiedener Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff. Der Abbau erfolgt sequentiell durch verschiedene Mikroorganismengruppen, in den Stufen Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese (Abbildung 5). Methan und Kohlendioxid stellen die Hauptabbauprodukte dar.

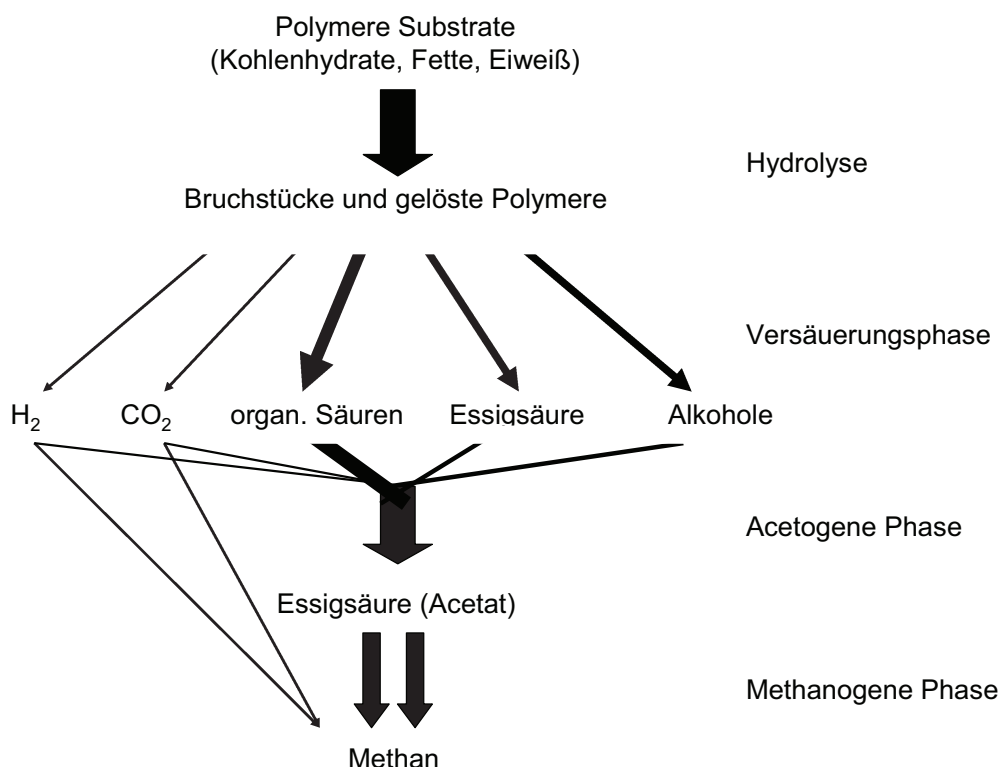


Abbildung 5 Darstellung des vierstufigen Biogasprozesses (GUJER & ZEHNDER 1983)

Langkettige organische Strukturen werden in der Hydrolysestufe durch enzymatische Reaktionen aufgespalten und in gelöste Bruchstücke überführt. In der Versäuerungsphase werden von verschiedenen fakultativ und obligat anaeroben Bakterienarten kurzkettige organische Säuren (z.B. Buttersäure, Propionsäure, Essigsäure), Alkohole, H₂ und CO₂ gebildet. In der acetogenen Phase werden, die in der Versäuerungsphase gebildeten organischen Säuren und Alkohole, zu Essigsäure umgebaut. Die acetogenen Bakterien müssen aus reaktionskinetischen Gründen eng mit den Methanbakterien vergesellschaftet sein. In der methanogenen Phase wird vornehmlich aus Essigsäure und H₂ und CO₂ Methan gebildet (KUNST, 2005).

Für die am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen (Biozönose) werden in der Literatur 4 Temperaturoptima angegeben (Tabelle 10).

Tabelle 10 Temperaturbereiche der Biozönose (KUNST 2005)

	Temperatur
Psychrophil	12 – 15 °C
Mesophil	36 – 43°C
Thermophil	50 – 55°C
Hyperthermophil	> 65°C

Die Spaltung längerkettiger organischer Strukturen wie Kohlenhydrate, Fette oder Proteine erfolgt von hydrolytisch wirkenden Mikroorganismen durch die Bildung von Exoenzymen. Die Hydrolyse kann in Abhängigkeit von den Stoffgruppen in drei Unterprozesse aufgeteilt werden (KUNST, 2005):

- Kohlenhydrate (Zucker, Hemicellulose, Cellulose, Pektin, Lignin) sind unterschiedlich gut hydrolysierbar. Zucker und Hemicellulose sind sehr gut aufzuschließen, während die Hydrolyse von Zellulose, Stärkekörnern oder Pektin entsprechend der Zellstruktur langsamer verläuft. Lignin ist dagegen so gut wie nicht hydrolysierbar.
- Der Abbau von Eiweißen unterscheidet sich von der Hydrolyse der anderen Stoffe durch seine Komplexität. Es können bis zu 20 verschiedene Aminosäuren gebildet werden. Die Hydrolyserate ist niedriger als bei Kohlenhydraten, häufig sogar geringer als bei Fetten.
- Die Hydrolyserate von Fetten erfordert eine Emulgierung des Fettes zur Oberflächenvergrößerung. Dann können fettsplappende Lipasen (Enzyme) besser angreifen. Fette werden bei der Hydrolyse vollständig, aber langsam hydrolysiert, allerdings nur wenn die Temperatur >20°C beträgt.

Tabelle 11 Substrate und Abbauprodukte der Hydrolyse

Kohlenhydrate	Zucker (Mono-/ Disaccharide)
Fette	Fettsäuren
Proteine	Aminosäuren

Beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung stellen Kohlenhydrate die hauptsächliche Stoffgruppe dar. Großen Einfluss auf die Hydrolysierbarkeit der Kohlenhydratfraktion hat die Zusammensetzung der Faserfraktion der Pflanze. Mit steigendem Ligninanteil in der Pflanze sinkt die Verdaulichkeit (WARD, 2005). WEISSBACH (2008, 2009) nutzt für eine rechnerische Bestimmung der Biogas- und Methanmenge den Asche- und Rohfasergehalt und kommt bei steigenden Rohfasergehalten zu niedrigeren Gaserträgen.

Die Abbaubarkeit verschiedener Stoffgruppen ist in Abbildung 6 nach OTTOW (1997) schematisiert.

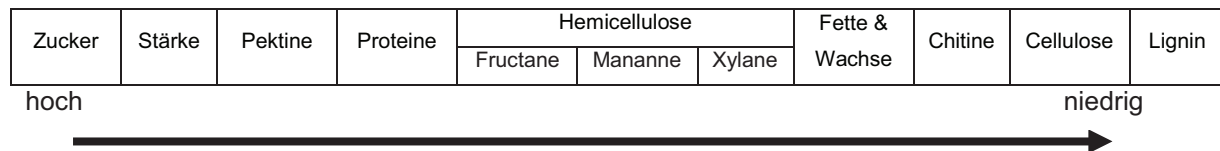


Abbildung 6 Abbaubarkeit von organischen Stoffen nach OTTOW (1997)

Die Abbaubarkeit von Fetten hängt von verschiedenen Merkmalen der Fette ab, insbesondere der Kettenlänge der Fettsäure und dem Grad der Sättigung. Die Strukturmerkmale und ihre Auswirkungen auf den anaeroben Abbau lassen sich nach SPIES (1986) gemäß Tabelle 12 zusammenfassen.

Tabelle 12 Bewertung der Merkmale von Fettsäuren nach SPIES (1986)

Merkmale der Fettsäure	Auswirkungen auf den anaeroben Fettabbau	
	Erschwerend	Erleichternd
Anzahl C-Atome	Hoch (langkettig)	Niedrig (kurzkettig)
Molekulargewicht	Hoch	Niedrig
Kettenstruktur	Verzweigt	Unverzweigt
Sättigungsgrad	Gesättigt	Ungesättigt
Löslichkeit im Wasser	Unlöslich	Löslich
Unlösliche Partikel	Grobdispers	Feindispers
Molekülstruktur	Zyklisch	Azyklisch

Rohfettgehalte in nachwachsenden Rohstoffen wie z.B. in Maissilage mit ca. 3% TM, oder in Sonnenblumen mit ca. 10 % (VALDEZ, 1988), spielen in der Vergärung nachwachsender Rohstoffe eine untergeordnete Rolle.

Gras-Silagen mit einem hohen Proteingehalt werden wiederum in der Praxis in nennenswerten Mengen eingesetzt. Bei der Eiweißversäuerung werden pH-puffernde Ionen freigesetzt, während bei der Versäuerung von Kohlenhydraten der pH-Wert weit ($< 4,0$) und schnell absinken kann. Eine hohe Stickstoffkonzentration, durch ein Überangebot an Proteinen, kann die Vergärung hemmen (KAYHANIAN 1994).

Acidogenese

Mikroorganismen bilden in der Versäuerungsphase, aus den durch Hydrolyse gebildeten Monomeren, verschiedene kurzkettige Carboxylsäuren. Weitere Zwischenprodukte sind Wasserstoff, CO_2 und einige kurzkettige Alkohole. Die Zusammensetzung der Endprodukte hängt von der Zusammensetzung des Substrates und von den Prozessbedingungen im Reaktor ab, insbesondere von der Substratbelastung und dem sich daraus ergebenden Wasserstoffpartialdruck.

Die bei der Kohlenhydrathydrolyse gebildeten Monomere werden bei niedrigen Wasserstoffpartialdrücken überwiegend zu Essigsäure sowie H_2 und CO_2 umgebaut. Bei höheren Wasserstoffpartialdrücken entstehen in zunehmendem Maße Propion- und Buttersäure. Bei pH-

Werten $< 4,5$ wird überwiegend Milchsäure produziert. Bei pH-Werten < 5 kann gelöste Glucose auch zu Alkohol (Ethanol) umgesetzt werden (KUNST, 2005).

Die Produkte der Eiweißhydrolyse, Dipeptide und Aminosäuren, werden in der Versäuerung zu Ammonium, Wasserstoff, Kohlendioxid und organischen Säuren umgewandelt (SEYFRIED, et al. 1994). Bei proteinreichen Substraten, wie z.B. Grassilagen, kann vermehrt das allgemein zytotoxische Produkt Ammonium entstehen. In Abhängigkeit von Temperatur und pH-Wert liegt der undissoziierte Teil des Ammoniaks vor, das Ammoniak, das für die Hemmung der Methanbildung verantwortlich ist (KAYHANIAN, 1994). Anlagen mit hohen Stickstofffrachten unterliegen grundsätzlich der Gefahr der Ammoniakhemmung, verstärkend wirkt hierbei eine thermophile Betriebsführung (LANGHANS, 2009).

Als Spaltprodukte des Fettabbaus entstehen in der Hydrolyse Glycerin, Phosphat und Fettsäuren. Der Abbau der langkettigen Fettsäuren erfolgt durch den mehrstufigen Prozess der β -Oxidation KUNST (2005). Glycerin kann vergleichbar mit Zucker durch eine Vielzahl von versäuernden Mikroorganismen abgebaut werden. Das Phosphat wird zu Ethanol und Methanol abgebaut SEYFRIED et al. (1994) SIEGRIST et al. (1995). Die Oxidation der Fettsäuren unter Abspaltung von Acetyleinheiten ist als β -Oxidation bekannt, da dabei das β -C-Atom ($-\text{CH}_2-$) der Fettsäure in einem vierstufigen Reaktionszyklus abgespalten wird. In der letzten Stufe erfolgt die thiolytische Abspaltung einer Acetyleinheit mit Coenzym A zu Acetyl-CoA und das um C_2 -verkürzte Acyl-CoA geht weitere β -Oxidationszyklen ein (SCHLEGEL, 2007). Der anaerobe Fettabbau ist ein relativ langsamer Prozess, da die langkettigen Fettsäuren nur schrittweise um die CH_2 -Kette abgebaut werden können und deswegen der Prozess mehrere Male, bis zum vollständigen Abbau, durchlaufen werden muss (KUNST, 2005). Bei ungeradzahligen Fettsäuren bleibt zuletzt ein Propionyl-CoA übrig. Abbauprodukt geradzahliger Dicarbonsäuren ist Succinyl-CoA (SCHLEGEL, 2007).

Wesentlich für die Versäuerung sind neben den Ausgangssubstraten die Milieubedingungen im Fermenter. Der Wasserstoffpartialdruck bestimmt in deutlichem Maße die Zusammensetzung der entstehenden Gärprodukte. In schwach belasteten Anlagen entstehen niedrige Wasserstoffpartialdrücke und neutrale pH-Werte, so dass überwiegend Essigsäure, Wasserstoff und Schwefelwasserstoff gebildet werden. Je höher der Wasserstoffpartialdruck ist, desto mehr reduzierte Verbindungen wie Propion-, Butter-, Valerian oder Capronsäure werden gebildet SCHERER (1995).

Einen Einfluss der Temperatur auf die Stoffwechselprodukte konnte bei der Versäuerung saccharidhaltiger Abwässer nachgewiesen werden. Temperaturen unterhalb von 30°C verschieben das Gärsäuremuster hauptsächlich zu Milch-, Propion- sowie Buttersäure, oberhalb von 30°C hingegen überwiegen Essig- und Buttersäure (TADDIGS, 2000).

Acetogenese:

Unter Acetogenese versteht man die Umwandlung von flüchtigen Fettsäuren (C3-C5) sowie von langkettigen Fettsäuren, in überwiegend Acetat sowie H_2 , CO_2 und H_2O . Da bei diesen Prozessen Elektronen abgegeben werden, spricht man von anaerober Oxidation. Die in der Versäuerung gebildeten Produkte sind unterschiedlich gut für die acetogene und methanogene Phase nutzbar. Der Abbau von Propionat zu Acetat erfolgt in der acetogenen Phase nur bei geringen Wasserstoffpartialdrücken und auch erst, wenn alle anderen Substrate aufgebraucht sind (JOSS und EDELMANN, 1999). Der Propionsäureabbau wird damit häufig zum limitierenden Schritt des anaeroben Abbaus; hohe Propionsäurekonzentrationen sind als ungünstig für die nachfolgenden Abbaustufen zu bewerten (HECHT & GRIEHL, 2006). Dauerhaft erhöhte Propionsäurewerte können bei güllelos und mesophil gefahrenen Anlagen mit Speisevergärung toleriert werden, wenn gleichzeitig der FOS/TAC-Wert 0,3 nicht wesentlich übersteigt und die Raumbelastung $< 3 \text{ kg oTM} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ beträgt. Der stabile Betrieb ist dann auf den hohen Eiweiß-Gehalt des Ausgangssubstrates und dem damit verbundenen NH_4^+ -/ NH_3 -Puffer zurückzuführen (JUNG & PRÖTER, 2008).

Allgemein weist (SCHERER, 2008) darauf hin, dass es bei hohen Konzentrationen an gelösten Gärprodukten zu hohen monetären Verlusten durch die tägliche Entnahme des Gärmediums aus dem Fermenter kommt.

Die bei der Silierung gebildeten Säuren werden durch unterschiedliche Mikroorganismen und über unterschiedliche Abbauewege im Biogasprozess umgebaut. Milchsäure wird als wichtige Säure zur Konservierung von Silagen über Propionsäure umgebaut (ZELLNER et al., 1994). Propionsäure ist nach (PIPIN & VERSTRAETE, 1981) sowie (RÜFFER & BOECK, 1986) das ungeeignetste Substrat für die Methanbildung.

Tabelle 13 Theoretische Gasausbeuten ausgewählter Gärprodukte der Silierung (eigene Berechnungen)

Substrat	Gasausbeute [L_N / kg oTS]	CH_4 [%]
Milchsäure	745,9	50
Essigsäure	745,9	50
Propionsäure	907,0	58
1,2-Propandiol	882,9	66
Ethanol	972,2	75

Ziel einer technischen Vergärung muss es sein, Prozessbedingungen sicherzustellen, die zu der gewünschten Gärung bzw. zu den gewünschten Versäuerungsprodukten führen JOSS & EDELMANN (1999). Für die Bereitstellung von landwirtschaftlichen Substraten für die Biogaserzeugung muss diese Forderung um die Silierung erweitert werden. Die Silierung muss mit der Zielsetzung erfolgen, das Erntematerial mit möglichst geringen Verlusten in der Substratbereitstellung der Vergärung zuzuführen und im Fermenter mit möglichst geringen Umbauverlusten einen maximalen Gasertrag zu erzielen.

Die Acetogenese kann unter Standardbedingungen (pH = 7; Temperatur = 25°C; Druck = 1 bar) nicht ablaufen, da sie für die Mikroorganismen mit keinem Energiegewinn verbunden ist. Exergon verlaufen die Prozesse nur bei sofortigem Verbrauch des Wasserstoffs durch andere Mikroorganismen. Die wasserstoffverbrauchenden Bakterien stehen dabei in symbiontischer Beziehung zu den wasserstoffproduzierenden Bakterien. Dieser Austausch der Wasserstoffatome zwischen den verschiedenen Mikroorganismengruppen (Interspecies-Hydrogen-Transfer) ist ein Vorgang, der innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde bei einem Abstand von wenigen Mikrometern (ca. 1 Bakterienlänge) abläuft (SAHM, 1981), (KUNST, 2005).

Methanogenese:

Die mikrobielle Methanbildung (Methanogenese) kann aus H_2 , CO_2 , Ameisensäure, Essigsäure, Methanol oder Methylen (z.B. CH_3NH_2 , $(CH_3)_2S$) erfolgen. Die Methanbakterien aus der Gruppe der Archaea katalysieren hierbei folgende Reaktionen:

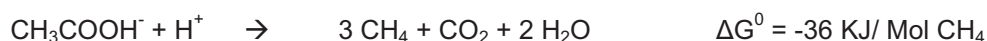
A) Reduktion von C_1 -Verbindungen:



B) Disproportionierung von C_1 -Verbindungen:



C) Disproportionierung von Essigsäure:



Während fast alle Spezies $H_2 + CO_2$ umsetzen können bzw. viele Spezies Ameisensäure, sind nur wenige Organismen in der Lage Essigsäure bzw. Methanol in Methan umzuwandeln. Trotzdem werden ca. 70% des Methans aus Essigsäure (Acetoklastische Methanbildung) und 30% aus CO_2 und H_2 (Hydrogenotrophe Methanogenese) gebildet (SMITH & MAH, 1996). Battenberg (2000) bestätigt diese Zahlen durch eigene Untersuchungen. Mittels Bromethansulfonsäure als Hemmstoff wurden hier die Anteile des acetoklastischen und des hydrogenotrop gebildeten Methans am insgesamt gebildeten Methan bestimmt.

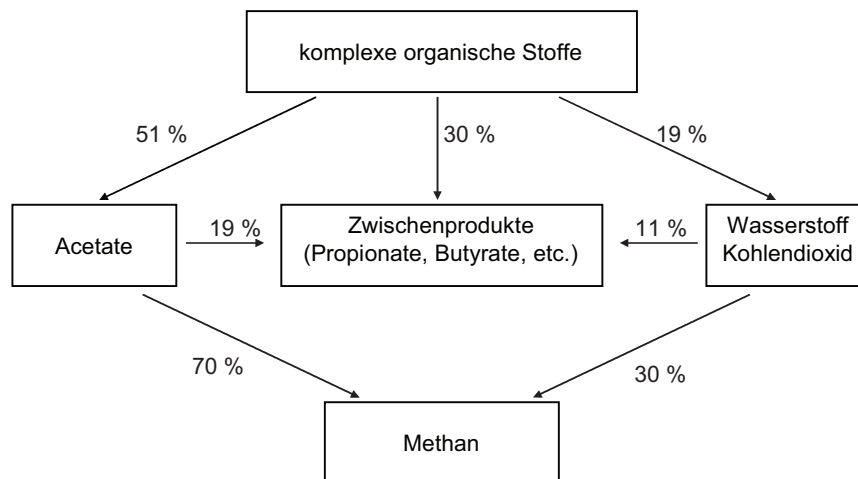


Abbildung 7: Kohlenstofffluss unter anaeroben Umweltbedingungen mit aktiver Methanogenese

GRAEF & ANDREWS (1974) sowie MÄRKL & FRIEDMANN (2006) gehen davon aus, dass besonders die Reaktion von Essigsäure zu Methan das dynamische Verhalten des Biogasprozesses dominiert. NUSSBAUM (2008) findet bei Vergärungsversuchen im Hohenheimer Biogasertragstest Unterschiede im Methangehalt sowie der Biogas- und Methanmenge zwischen verschiedenen Gärprodukten der Silage. Essigsäure zeigt hierbei gegenüber der Milchsäure höhere Methangehalte (61,6% vers. 59,0%) und einen höheren spezifischen Gasertrag ($0,396 \text{ Nm}^3 / \text{kg oTM}$ vers. $0,350 \text{ Nm}^3 / \text{kg oTM}$). Andere Gärprodukte der Silierung wie Ethanol und 1,2-Propandiol werden sehr schnell umgesetzt. Mit welchen metabolischen Stoffwechselprodukten der Abbau erfolgt konnte nicht untersucht werden. Aufgrund der absolut kleinen Zulage der Gärprodukte erscheint die Interpretation der Methanbildung nach Aussage des Verfassers schwierig.

Die acetoklastische Methanbildung erfolgt durch die beiden Gattungen *Methanosarcina* und *Methanotherix* (EGGEN & VOS, 1993). Der Abbau von Essigsäure erfolgt über die Aufnahme in die Zellen und dessen Aktivierung zu Acetyl-CoA unter enzymatischer Einwirkung (SCHLEGEL, 2007). Die Aktivierung des Acetats erfolgt bei *Methanosarcinales* zweistufig durch das Enzym Acetatkinase und im zweiten Schritt der Phosphat-Acetyltransferase. *Methanotherix* aktiviert Acetat mit Hilfe von Acetyl-CoA-Synthase. Schlüsselenzym in der weiteren Spaltung von Acetyl-CoA ist Kohlenmonoxidhydrogenase, die Acetyl-CoA in Kohlenmonoxid (CO) und in Methyl (CH_3^-) spaltet. Die Methyleinheit wird durch Methyltransferase und Methyl-CoM-Reduktase unter Nutzung der freigesetzten H^+ -Ionen zu CH_4 reduziert (EGGEN & VOS, 1993).

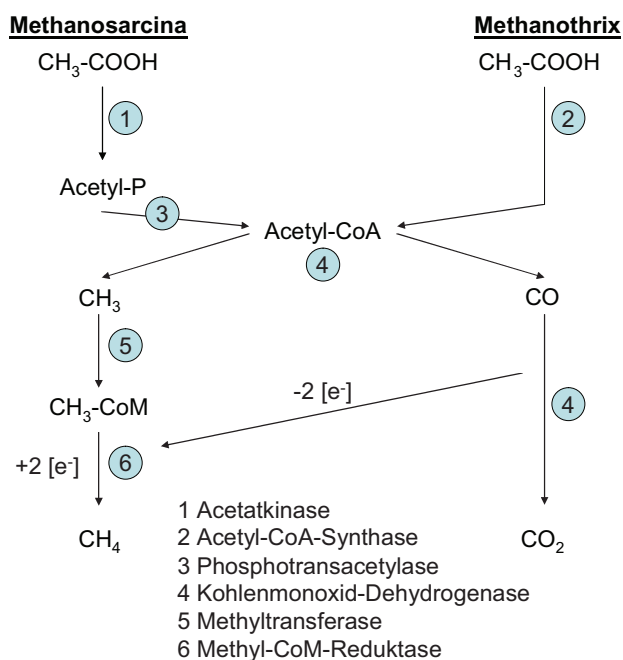


Abbildung 8 Acetoklastische Methanbildung der Gattungen Methanosarcina und Methanothrix (verändert nach EGGEN & VOS, 1992)

Methanothrix gilt als Nahrungsspezialist mit hoher Affinität zum Substrat (OUDE-ELFERINK et al. (1998), JETTEN et al. (1992)). Der Organismus kann Acetat schon bei Konzentrationen (0,069 mmol/L) metabolisieren, die zehn bis hundertfach niedriger sind als die Schwellenkonzentration, die Methanosarcina (0,396 – 1,180 mmol/l) mindestens benötigt (WESTERMANN et al., 1989). In schwach belasteten Abwasserbehandlungsanlagen mit Verweilzeiten von mehr als 15 Tagen bei 35°C ist Methanothrix der vorherrschende acetoklastische Mikroorganismus ((DuBOURGUIER et al., 1988), (GROTEHUIS et al., 1991), (MacLEOD et al., 1990), (THIELE et al., 1990), (WU et al., 1992). Methanothrix hat zwar nur eine geringe Wachstumsrate (μ_{\max}) gegenüber Methanosarcina, erreicht aber seine halbmaximale Wachstumsgeschwindigkeit schon bei Essigsäuregehalten von 0,72 mmol/l.

Tabelle 14: Gegenüberstellung von Methanothrix soehngenii und Methanosarcina sp. (nach Ten BRUMMELER et al. (1985), ZEHNDER et al. 1980))

Organismus	μ_{\max} [h ⁻¹]	$K_{M(\text{Ac})}$ [mmol/l]	Y_s	pH- Optimum	Temp- Optimum	Substrate	Gestalt	Habitat
Methano- thrix	0,0032	0,72 (0,46) ³	2,14	7,8	37	Essigsäure	Stäbchen, Filamente aus 100 – 300 Zellen	Anaerob- schlamm/ Klär- schlamm
Methano- sarcina	0,02 - 0,03	5,0	1,4	6 – 8	40 – 45	Essigsäure Methanol, H ₂ , Methylamine	Kokkenpakete, die z.T. große Aggregate bilden	Acetat- reiche anaerobe Standorte

Biomasseneubildung:

Bei der Vergärung werden nur 7% des Energiegehaltes in der Biomasse fixiert, weitere 11% gehen als Wärme verloren und 82% stehen in Form von Biogas als Energieträger zur Verfügung (GALLERT, 1998). McINERNEY & BRYANT (1979) schätzen, dass etwa 90%, der im abzubauenden organischen Material verfügbaren chemischen Energie, sich im produzierten Methan wiederfinden. Untersuchungen zur Selbsterwärmung landwirtschaftlicher Biogasanlagen deuten darauf hin, dass der Biogasprozess stärker exotherm ist als bisher angenommen (LINDORFER, 2007). Nach VDI 4630 werden für den Abbau von mikrokristalliner Cellulose ca. 10% Umbauverluste erwartet (ANONYM, 2006).

2.2.2 Verfahrensschritte landwirtschaftlicher Biogasanlagen

2.2.2.1 Verfahrenskonzepte und Betriebsweisen

Die Verfahrenskonzepte landwirtschaftlicher Biogasanlagen können nach Art der Beschickung, Prozesstemperatur sowie Durchmischungsverfahren charakterisiert werden (Abbildung 9).

Sonderformen der Vergärung wie z.B. zweistufige Prozessführung durch eine vorgeschaltete Hydrolyse (TADDIGS, 2000) oder Perkulationsverfahren (SANTEN 2007), wie sie in der Abfall- und Reststoffbehandlung zum Einsatz kommen, spielen in der Praxis bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen derzeit noch eine untergeordnete Rolle. Hinsichtlich der Optimierung der Biogasgestehung wird der Einsatz von Hydrolyseverfahren von verschiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen überprüft (LOEWE, 2008), (OECHSNER & LEMMER, 2009).

Für die Vergärung nachwachsender Rohstoffe hat sich in der Praxis das Durchflussverfahren (kontinuierliche Systeme) etabliert. Zur Vergärung von strukturreichem Material oder Material mit hohen Fremdstoffbelastungen und Abfallströmen werden vielfach Boxen-Fermenter im Batch-Betrieb (diskontinuierliche Systeme) genutzt.

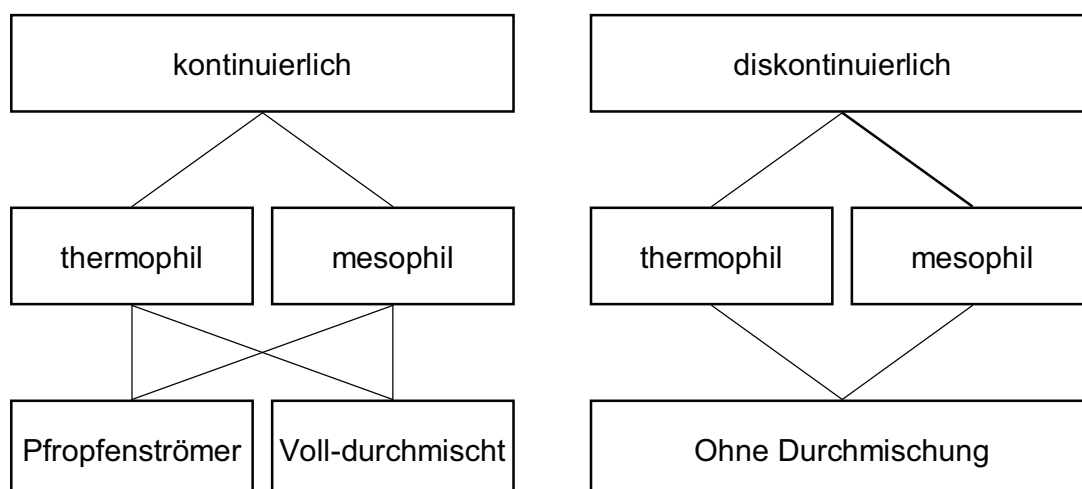


Abbildung 9 Verfahrenskonzepte und Betriebsweisen von Biogasanlagen

Biogasfermenter sind definiert als beheizte, durchmischte Behälter mit einer Abdeckung zur Gasfassung. Klassische Behälterformen, landwirtschaftlicher Anlagen, werden als Betonbehälter ausgeführt und weisen ein geringes Höhen-zu-Breiten-Verhältnis auf. Stehende Behälter ($h/b > 2$) werden oftmals als Stahlkonstruktion mit einem Zentralrührwerk ausgeführt.

Charakteristisches Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Durchflussverfahren ist die Ausführung des Fermenters als volldurchmisches System oder als Pfropfenströmer. Bauartbedingt kommt es bei volldurchmischten Systemen zu einem mehr oder minder großen Kurzschlussstrom, bei dem un- oder nur teilvergorenes Material aus dem Fermenter entnommen wird.

Pfropfenströmer unterscheiden sich analog ihrer Konzeption auch in der baulichen Form der Fermenter. Propfenströmer sind liegende Fermenter mit einer in Längsachse eingebauten Paddelwelle. Der Transport des Fermenterinhalts erfolgt durch den Verdrängungseffekt des zugeführten Substrates. Die eingebaute Paddelwelle dient dabei der Ausgasung des Substrates und ist nicht zum aktiven Transport des Fermenterinhalts gedacht. Verschiedene Hersteller bieten Kombinationen aus Pfropfenströmer und nachgeschaltetem Rührkesselfermenter an. Praxisuntersuchungen konnten keine allgemeine Empfehlung zur Vorzüglichkeit eines Fermentersystems zeigen (EHRMANN, 2008).

Fermenter im Durchflussverfahren unterliegen nur geringen Füllstandsschwankungen, da ein der Zufütterungsmenge äquivalentes Volumen über eine aktive (Pumpen) oder passive (Überlauf) Entnahme in weitere Fermenter bzw. in ein Gärproduktelager überführt wird.

Die Festlegung der Betriebstemperatur wird oftmals durch vorgelagerte Behandlungsschritte festgelegt. So sind bei Anlagen mit vorgeschalteter Hygenisierung (Abfallvergärungsanlagen, Einsatz von Schlachtabfällen als Substrat, etc.) vielfach thermophil betriebene Fermenter zu finden. Im landwirtschaftlichen Bereich dominiert die mesophile Temperaturführung, wobei es regionale Unterschiede im gewählten Temperaturbereich gibt. So wurden von HOELKER (2009), durch die Analyse von 1.200 Biogasanlagen in Deutschland, regionale Unterschiede in der Fermentertemperatur herausgearbeitet. Norddeutsche Biogasanlagen werden vorwiegend bei ca. 40°C betrieben, Biogasanlagen in Süddeutschland im Mittel bei 45°C.

2.2.2.2 Substratlogistik

Durch die in Mitteleuropa begrenzte Wachstumszeit auf die Sommermonate und die damit verbundene einmalige Ernte (Mais) muss das Erntematerial konserviert werden, um ganzjährig als Substrat zur Verfügung zu stehen. Die Konservierung als Silage kann in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Biogasanlage erfolgen oder in so genannten Satelliten-Silos außerhalb der eigentlichen Biogasanlage. Räumliche Zwänge, benötigte Substratmengen oder der Zukauf von siliertem Material führen zur Silierung außerhalb der Biogasanlage und einem damit verbundenen Transport des Materials.

Nach Entnahme der Silage aus dem Silostock erfolgen Transport und Lagerung mit einer Raumdichte, die losem Schüttgut entspricht. Für frisches Häckselgut konnten in Abhängigkeit des Trockenmassegehaltes Transportdichten zwischen ca. 80 und 170 kg TS•m⁻³ ermittelt werden (HANDLER und BLUMAUER, 2007). Untersuchungen des VTI (2004) ergaben als Schüttdichte für Maissilage 250 kg FM•m⁻³. Für Silagen ist je nach Entnahmetechnik mit ähnlichen Transportdichten zu rechnen. Die Transportdichten liegen damit um den Faktor 2 – 3 unter den Zielverdichtungen im Silo.

Der Gasaustausch ist in großem Maße vom Porenvolumen abhängig, wobei ein geringes Porenvolumen einen hohen Strömungswiderstand bedingt. ROSS et al. (2008) ermittelten in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt unterschiedliche Porenvolumina bei variierenden Lagerungsdichten. Mit einer Lagerungsdichte von 150 kg•m⁻³ bei einer Silage mit 39% TM wurde eine mittlere Porosität von 66,1% ermittelt. Bei gleicher Lagerungsdichte zeigte eine Silage mit 29% TM eine Porosität von 54,4%. Eine Erhöhung der Lagerungsdichte führt zu einer sinkenden Porosität, wobei der Einfluss des Trockenmassegehaltes steigt. Gegenüber einer Differenz von 11,7% bei 150 kg m⁻³, ergibt sich bei 239 kg m⁻³ eine Differenz von 19,2%.

Neben den entfernungsabhängigen Transportkosten ist das Silagegut, somit während des Transportes und einer möglicherweise erforderlichen Zwischenlagerung auf der Biogasanlage, dem Luftsauerstoff ausgesetzt. Durch Manipulation des Materials, wie z.B. Aufladen, Transport, Abkippen, Zwischenlagern, Aufladen und Eintrag in den Fermenter kommt es zu einer vollständigen Belüftung des Materials. Eine Reduzierung der Energiedichte durch Zwischenlagerung wird von STEINHÖFEL (2004) in sächsischen Silagen dargestellt. HERBES (2009) erachtet darum auch den Einsatz von Siliermitteln zur Erhöhung der aeroben Stabilität bei der Biogaserzeugung als besonders sinnvoll.

2.2.2.3 Einbringtechnik

Die tägliche Substratversorgung des Fermenters erfolgt über Einbringsysteme, die in frei wählbaren Taktzeiten (üblich 24 oder 48 Taktung/Tag) Teilmengen der Tagesmenge, in den Fermenter zudosieren. Der Eintrag kann dabei durch Stopfschnecken (trocken), oder über Anmischbehälter und ein Pumpensystem (nass) erfolgen. Gängigste Methode ist der trockene Eintrag über Stopfschnecken. Die benötigten Substratmengen werden in Vorlagebehältern zwischengelagert, die je nach Größe, Fütterungsmenge und Schüttdichte täglich oder öfter befüllt werden. Zur Optimierung des Arbeitsablaufes wird von den Anlagebetreibern eine einmal tägliche oder seltenere Befüllung angestrebt.

Bei gegebener Vorlagebehältergröße stellt die Schüttdichte der eingesetzten Substrate die Füllmengen bestimmende Größe dar. Die Schüttdichte eines Schüttgutes ist abhängig von Partikelabmessung, Schütthöhe, etc. Im Gegensatz zur Silierung, bei der die Silohöhe einen

signifikanten Einfluss auf die Lagerungsdichte hat, ist dies bei üblichen Abmessungen des Vorlagebehälters auszuschließen. Erfahrungen der Praxis zeigen einen Einfluss des Substrates auf die im Vorlagebehälter realisierbaren Gewichtsmengen. So werden bei Grassilagen geringere Gewichtsmengen gegenüber der Befüllung mit Maissilage erreicht. Resultieren kann dies aus den Partikelgrößen, die bei Grassilage größer sind und der damit verbundenen stärkeren Verzahnung, die auch in der schwierigeren Verdichtung von Gras bei der Silierung deutlich wird. Aggregate im Vorlagebehälter zur Zerkleinerung oder Homogenisierung unterschiedlicher Chargen wirken ebenfalls negativ auf die Schüttdichte. Ebenfalls kommt es durch die ständige Bewegung des Materials zu einer vollständigen Belüftung des Substrates.

2.2.2.4 Biogasgestehung aus nachwachsenden Rohstoffen

Die Beurteilung von Substraten zur Biogaserzeugung erfolgt vielfach auf Grundlage des Biogasertrages und Trockenmasseertrages pro Hektar. Die Bestimmung des Biogas-/ Methanertrages kann rechnerisch aus den Inhaltsstoffen oder durch Vergärungsversuche bestimmt werden.

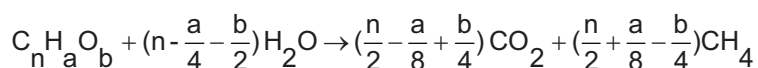
Grundlage verschiedener rechnerischer Verfahren sind die Gaserträge nach BASERGA (1998) für die Stoffgruppen Kohlenhydrate, Rohprotein und Rohfett (Tabelle 15). Problematisch ist hierbei, dass für die einzelnen Stoffgruppen, mit mittleren Gasausbeuten gerechnet wird.

Tabelle 15: Gasausbeuten nach Baserga (1998)

Stoffgruppe	Gasausbeute [l _N / kg]	CH ₄ -Anteil [%]
Kohlenhydrate	790	50
Rohprotein	700	71
Rohfett	1250	68

Eine stöchiometrische Berechnung des Gasertrages auf Grundlage der Bestandteile Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff kann nach Buswell vorgenommen werden (Formel 6). Unterstellt wird hierbei eine vollständige Umsetzung des Kohlenstoffs zu Methan und Kohlendioxid, was zu einer systembedingten Überschätzung des Gasertrages führt.

Formel 6 Rechnerische Bestimmung des Biogas- und Methanpotentials nach BUSWELL (1952)



KEYMER & SCHLICHTER (1999) versuchen diese Problematik durch die Berücksichtigung von Verdaulichkeitskoeffizienten zu umgehen. In Ermangelung von Verdaulichkeitskoeffizienten für die Biogasgestehung werden hierbei Koeffizienten aus der Tierernährung eingesetzt.

Ausgehend von der erweiterten Weender-Futtermittelanalytik berechnen AMON (2006) sowie KAISER (2007) den Gasertrag verschiedener Substrate. Neben einer umfangreichen Analytik sind beide Berechnungsverfahren nur auf die kalibrierten Substrate anwendbar. WEISSBACH (2008) reduziert den Untersuchungsumfang auf die Gehalte an Rohasche und Rohfaser zur Bestimmung des Gasertrages. Der Bewertungsparameter entspricht dabei der fermentierbaren organischen Trockenmasse (FoTS). Die FoTS ist nach Weissbach „als diejenige Menge an oTS zu definieren, die unter anaeroben Bedingungen potenziell durch Mikroorganismen abgebaut werden kann und die sich deshalb unter optimalen Prozessbedingungen und bei ausreichend langer Prozessdauer in Biogasanlagen biologisch nutzen lässt“. Die Rohfaserverdaulichkeit wurde hierbei aus Hammel-Versuchen abgeleitet, bei denen die Tiere auf Erhalt gefüttert wurden. Die maximale Methanmenge wird dabei substratspezifisch mit $400 \text{ l} \cdot \text{kg TS}^{-1}$ für Maissilage angenommen. In ersten Berechnungen zeigt der aus FoTS berechnete Ausnutzungsgrad im Vergleich mit praktischen Biogasanlagen eine gute Übereinstimmung (WEISSBACH, 2009).

Aus der Abfalltechnik und Siedlungswasserwirtschaft wird der anaerobe Abbau mittels Gärtests nach DIN 38414-S8 für Faulschlämme oder der Gasbildungsrate nach 21 Tagen (GB_{21} für biologische Abfälle) sowie rechnerisch über den CSB nach ATV Arbeitsblatt A128 berechnet. Für die Bestimmung des maximalen Biogasertrages nachwachsender Rohstoffe gilt VDI Richtlinie 4630 ANONYM (2006). Die Festlegung der Probeneinwaage erfolgt aus dem Verhältnis der organischen Trockenmasse von Substrat und Inoculum, wonach das Verhältnis von 1:2 nicht überschritten werden darf. Zur Bestimmung der Güte des Inoculums erfolgt die Vergärung eines Standardsubstrates (Cellulose) mit bekannter theoretischer Gasausbeute. Eine Wertung des Versuches darf nur erfolgen, wenn 80% des theoretischen Gasertrages erzielt werden, wobei für die Berechnung des theoretischen Gasertrages ein Bakterienwachstum von 10 % unterstellt wird. Der Versuch kann beendet werden, wenn pro Tag weniger als 1% der bis dahin gebildeten Gasmenge entsteht. MAEHNERT (2007) extrapoliert die Gasbildungskurve mittels Hill und Chapman-Funktion und definiert diese Gasmenge als y_{\max} .

Der von verschiedenen Autoren beobachtete Anstieg der Methanausbeute pro Einheit organischer Trockenmasse durch die Silierung (HERRMANN et al., 2008), (IDLER et al., 2007), (LETHOMÄKI, 2006), (NEUREITER et al., 2004) bleibt kritisch zu hinterfragen. Die Autoren führen die Erhöhung auf eine gesteigerte Säurebildung während der Silierung zurück. PLÖCHL et al. (2009) konnten für verschiedene Silagen eine gesteigerte Methanausbeute bei steigenden Essigsäuregehalten der Silage nachweisen. Den Einfluss von verschiedenen Siliermitteln auf Gär säuremuster und Biogasausbeute wird von HERRMANN (2008) im Rahmen des Projektes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ (EVA) untersucht. Unter Berücksichtigung der Gär gasverluste konnte durch Einsatz eines heterofermentativen Siliermittels eine Steigerung der Methanausbeute bei Mais und Sorghum ermittelt werden. Der Methanertrag wurde bei Mais um 17% gesteigert, bei Sorghum um 12%.

Es ist anzunehmen, dass es auf Grund der Außerachtlassung von flüchtigen Bestandteilen bei der Trocknung zu einer Überschätzung des spezifischen Gasertrages auf Trockenmasse-Basis kommt (MUKENGELE, 2007), (WEISSBACH, 1995 & 2008). Aufgrund der stofflichen Eigenschaften, der bei

der heterofermentativen Silierung vorangig gebildeten Stoffwechselprodukte (Essigsäure, 1,2-Propandiol), werden die Gaserträge bezogen auf die unkorrigierte Trockenmasse bei heterofermentativer Silierung unverhältnismässig überschätzt.

Eine umfangreiche Zusammenstellung von Gaserträgen verschiedenster Pflanzenmaterialien liegt in Form der KTBL-Tabellen vor (KTBL, 2006). In den wenigsten Fällen sind vorgelagerte Verluste wie z.B. Silierverluste berücksichtigt. Für eine Ergebnisdarstellung als Gaserträge pro Flächeneinheit werden oftmals pauschale Verlusthöhen angesetzt (KTBL, 2006), (DANIEL & SCHOLWIN, 2008), (GROEBLINGHOFF & LÜTKE-ENTRUP, 2004). OHLY (2006) pauschaliert die Ernte- und Silierverluste bei Grasmaterial mit 20% und bei Maissilage mit 12% Trockenmasseverlusten, DANIEL & SCHOLWIN (2008) nennen 10%, unabhängig vom Erntematerial, GROEBLINGHOFF (2004) 15 %. KTBL-Werte pauschalisieren Silierverluste mit 7 %, wobei eine Sickersafrückführung in den Fermenter unterstellt wird.

Verschiedene Autoren befassen sich mit möglichen Aufbereitungstechniken und deren Einfluss auf den Gasertrag. SCHUMACHER (2008) beobachtet bei unsiliertem Material durch verschiedene Aufschlussverfahren positive Auswirkungen auf die Gasbildung und Gasmenge.

Positiven Einfluss einer kürzeren Häcksellänge auf die Methanausbeute werden ebenfalls von verschiedenen Autoren beschrieben (PALMOWSKI, 2000), (VTI, 2004). Die erhöhte Gasausbeute wird dabei auf eine vergrößerte Oberfläche und auf die Zerstörung von Zellstrukturen zurückgeführt (PALMOWSKI, 2000).

2.2.3 Zusammenfassung Biogasgestehung

Die Vergärung organischer Stoffe erfolgt nach derzeitigem Kenntnisstand über den vierstufigen Biogas-Prozess: Hydrolyse – Acidogenese – Acetogenese und Methanogenese. Der Abbau erfolgt durch ein Zusammenspiel verschiedener Bakterien, die teilweise syntroph und mutualistisch zusammenwirken. Die anaerobe Behandlung von organischen Stoffströmen stellt eine etablierte Methode in der Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik dar (NELLES, 2009). Hieraus resultiert auch, in vielen Fällen, der aktuelle Wissensstand und die aktuelle Praxis der Biogasgestehung (BISCHOFBERGER 2005). Die Vergärung nachwachsender Rohstoffe stellt auf Grund der derzeitigen energiepolitischen Rahmenbedingungen eine wirtschaftliche Alternative zu anderen Erwerbsformen der klassischen Landwirtschaft dar.

Bei der Vergärung von speziell angebauten Substraten für die Biogaserzeugung handelt es sich, in den meisten Fällen, um biologisch gut abbaubare Substrate. Einzig Lignin und Lignin-inkrustierte Verbindungen werden im Biogasprozess nur schwer abgebaut (OTTOW, 1997). Spezielle Probleme der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung ergeben sich aus der Monovergärung von Substraten und dem Einsatz stickstoffreicher Substrate (POBEHEIM, 2010), (KAYHANIAN, 1994).

Die angemessene monetäre Bewertung von Substraten zur Biogaserzeugung stellt einen erheblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Betriebsführung von Biogasanlagen (HERBES, 2009). Die Ermittlung des Biogaspotentials kann durch Batch-Versuche erfolgen, die eine Aussage zum maximalen Biogaspotential erlauben VDI 4630 (ANONYM, 2006). Kontinuierliche Versuche werden in der Regel zur Optimierung von Prozessparametern und verfahrenstechnischen Fragestellungen durchgeführt. Die Bestimmung des Gasertrages aus einer einfachen Analytik heraus wird verschiedentlich beschrieben (AMON, 2006), (KAISER, 2007), (WEISSBACH, 2008). Einflüsse von Aufbereitungsverfahren oder der Silierung auf die Biogasbildung können mit diesen Verfahren nicht erfasst werden.

Der Biogasertrag in der Praxis ist neben den eingesetzten Substraten wesentlich von der Verfahrenstechnik sowie den Milieubedingungen im Prozess abhängig. Die große Mehrzahl landwirtschaftlicher Anlagen wird im mesophilen Temperaturbereich betrieben (DBFZ, 2009). In Abhängigkeit der Verweilzeit ergeben sich unterschiedliche Ausnutzungsgrade des eingesetzten Substrates. Unterhalb von 80 Tagen Verweilzeit kommt es zu einem starken Anstieg des Restgaspotentials zwischen 10 und 15%, in Ausnahmefällen bis 30% (VOGTHERR, 2007). Verweilzeiten oberhalb 110 Tagen reduzieren das Restgaspotential auf weniger als 5%. WEISSBACH (2008) sieht das minimale Gärrestpotential bei ca. 4%, bedingt durch die im Gärrest vorhandenen Mikroorganismen, die in sich, auch eine organische Quelle darstellen.

Die Optimierung des Biogaspotentials durch mechanische oder biologische Aufbereitungsschritte zeigen nur begrenzte Erfolge oder erfordern derzeit einen unverhältnismäßig hohen energetischen Aufwand (SCHUMACHER, 2008) (MÜLLER, 2009).

Die ganzjährige Bereitstellung eines Substrates mit gleichbleibenden stofflichen und energetischen Eigenschaften ist Grundvoraussetzung für eine stabile Prozessführung der Biogasanlage. Die Silierung von feuchtem Erntegut stellt z.Z. die einzige kostengerechte Konservierungsform für Substrate der Biogaserzeugung dar. Die bei der Silierung gebildeten organischen Verbindungen (Säuren und Alkohole) werden über verschiedene Abbauewege zu Methan und Kohlendioxid reduziert. Je nach Komplexität der Verbindung bedarf es mehrerer Abbau- und Aktivierungsschritte (β -Oxidation). Die von verschiedenen Autoren beschriebenen Positive Einflüsse der Silierung auf die Biogasausbeute (HERRMANN, 2008), (IDLER, 2007), (LETHOMÄKI, 2006), (NEUREITER et al., 2005) müssen kritisch hinterfragt werden. Die Autoren führen dies auf eine gesteigerte Säuremenge durch die Silierung zurück. Untersuchungen von MUKENGELE (2007) und WEISSBACH (2008) weisen auf die Überschätzung des Gasertrages bezogen auf Trockenmassebasis hin, wenn flüchtige Bestandteile der Silage im Trockenmassebezug nicht berücksichtigt werden. Die heterofermentative Silierung ist hierbei durch die gebildeten Stoffwechselprodukte (Essigsäure, 1,2-Propanediol) überproportional betroffen.

Die acetoklastische Methanbildung ist nach verschiedenen Autoren zu 70% an der gesamten Methanbildung beteiligt (SMITH & MAH, 1996), (BATTENBERG, 2000). GRAEF & ANDREWS (1974) sowie MÄRKEL & FRIEDMANN (2006) gehen davon aus, dass besonders die Reaktion von Essigsäure zu Methan das dynamische Verhalten des Biogasprozesses dominiert.

3 Material und Methoden

Die verwendeten Analysemethoden für Silagen entsprechen den Analysevorschriften der VDLUFA-Vereinigung Methodenbuch 1-3 (2006) sowie den einschlägigen Normen und Richtlinien (Tabelle 16). Die statistische Auswertung erfolgte mittels des Computerprogramms MiniTab® und Microsoft Excel®.

Tabelle 16 Zusammenfassung der ermittelten Parameter

Parameter	Kurzbezeichnung	Durchführung
Weender-Analytik		
Trockenmasse	TM	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 4.3
Trockenmasse _{Korrigiert}	TM _k	WEISSBACH (2008)
Rohasche	XA	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 8.1
Rohfaser	XF	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 6.1.1
Säure-lösliche Faser	ADF	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 6.5.2
Neutral-lösliche Faser	NDF	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 6.5.1
Hemicellulose	Hemi	Berechnung Hemi = NDF-ADF
Rohfett	XL	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 5.1.1
Stärke	XS	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 7.2.1
Zucker	XZ	VDLUFA Methodenbuch, Kap. 7.1
Gärparameter		
Gärsäuren und Alkohole	Säuren und Alkohole	HPLC
Aerobe Stabilität	ASTA	Verfahren nach HONIG (1999)
Mikrobiologie		
Milchsäurebakterien	MSB	MRS-Agar
Hefen	-	Auszählmethode auf Agar-Boden YGC-Agar
Schimmelpilze	-	Auszählmethode auf Agar-Boden YGC-Agar
Gaserträge		
Methanertrag	L _N CH ₄	Batch-Versuche VDI 4630, Bestimmung aus FoTS nach WEISSBACH (2008)
Abbauwege verschiedener Kohlenstoffquellen		Batch-Versuche VDI 4630 Fed-Batch Versuche

3.1 Silierung & Lagerung

Bilanzierungs-Silagen:

Die im Rahmen der Bilanzierung untersuchten Silagen wurden als Laborsilagen in unterschiedlichen Behältergrößen einsiliert (Silierversuch 1, 2, 4 und 5: 5 Liter Eimer; Silierversuch 3: Weckgläser 1,5 Liter). Die Silierung erfolgte in 5-facher Wiederholung. Die Befüllung der Silagen erfolgte in Schichten mit Verdichtung durch eine Laborpresse, die Verdichtung der Weckgläser erfolgte händisch. Die Silierdauer betrug bei allen Silagen 90 Tage bei einer Lagertemperatur von 21°C.

Praxissilagen:

Die untersuchten Praxissilagen wurden von landwirtschaftlichen Betrieben bezogen. Die Entnahme aus dem Silostock wurde aus der frischen Anschnittfläche vorgenommen und sofort der Analytik zugeführt. Eine weitergehende Beschreibung der Silierbedingungen vor Ort wurde nicht vorgenommen.

Applikation der LAB:

Als Siliermittel wurde ein kommerziell erhältliches biologisches Siliermittel mit einer Mischung aus verschiedenen MSB (*L. buchneri*-LB, *L. plantarum*-LP, 2×10^5 KbE/g; Lactosan Starterkulturen GmbH und Co.KG) eingesetzt. Das Laktobakteriengranulat wurde in Wasser angesetzt. Die Aufwandmenge wurde aus den Herstellerangaben übernommen und betrug 2 g/t FM, was einer KbE von 2×10^5 cfu/g FM entspricht. Die Applikation erfolgte über einen Druck-beaufschlagbaren Zerstäuber ohne Restmenge.

Eingesetztes Pflanzenmaterial:

Das Versuchsmaterial stammt aus verschiedenen Praxisbetrieben und wurde zu Beginn der Ernte entnommen. Angaben zum Anbau wurden nicht erhoben. Aufbereitungsgrad, Häcksellänge und Erntezeitpunkt entsprechen den in der Praxis anzutreffenden üblichen Größen und Schwankungen. Verfahrenstechnische Unterschiede vor der Ernte werden nicht berücksichtigt. Ein Siliermitteleinsatz erfolgte nicht auf den Praxisbetrieben.

Trockenmasse:

Die Bestimmung des Trockenmassegehaltes erfolgte als Trocknung mit Vortrocknung. Die Vortrocknung erfolgte bei 65°C für 2 Tage, im Anschluss eine Nachtrocknung für 4 Stunden bei 105°C. Der Gesamttrockenmassegehalt ergibt sich nach Formel 7.

Formel 7 Berechnung Trockenmassegehalt aus zweistufiger Trocknung

$$TS = TS_{65^\circ\text{C}} \cdot \frac{TS_{105^\circ\text{C}}}{100}$$

Die Korrektur des Trockenmassegehaltes, um die bei der Trocknung leicht flüchtigen Bestandteile, erfolgt nach Formel 8.

Formel 8 Korrektur des Trockenmassegehaltes um die leicht flüchtigen Bestandteile nach WEISSBACH (2008)

$$TS_k = TS_n + 0,95 \cdot NFS + 0,08 \cdot MS + 0,77 \cdot PD + 1,0 \cdot AA \text{ [g kg}^{-1}\text{FM]}$$

NFS= Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren (C2 bis C6)

MS= Gehalt an Milchsäure

PD= Gehalt an 1,2-Propandiol

AA= Summe der Gehalte an anderen Alkoholen (C2 bis C4, inklusive 2,3-Butandiol)

Fermentationsprodukte:

Die Bestimmung der Fermentationsprodukte erfolgte aus einem Extrakt der Silage. Das Material wird ohne Zerkleinerung im Verhältnis 20g Material und 80g Aqua des. in einen Stomacher-Beutel eingewogen und 5 min im Stomacher homogenisiert. Aus der filtrierten Probe erfolgt die pH-Wert-Bestimmung sowie die Zucker- und Gärparameter-Bestimmung mittels HPLC-Analytik. Säuren bis einschließlich C6 (Iso-Valeriansäure) sowie ein- und zweiwertige Alkohole bis n-Butanol können bis zu einer Genauigkeit von 0,02 g/l bestimmt werden.

Die Säureanalytik der Fermenterproben erfolgt ebenfalls mittels HPLC. Die Probe wird im Vorfeld zentrifugiert (10.000g) und filtriert.

Tabelle 17: Charakterisierung der HPLC-Analytik

Bauteil	Hersteller / Beschreibung
Gerät	HP
Säule	Knauer BioRad
Optik	IR-Sensor, UV/VIS-Detektor
Flussmittel	1 molare H ₂ SO ₄
Laufzeit	28 Minuten

Weender-Analytik:

Die Bestimmung der Weender-Analytik erfolgt aus dem bei 65°C vorgetrockneten und anschließend gemüllerten Material. Die angewendeten LUFA-Verbandsmethoden sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Methodik der Weender Analytik

Parameter	Kurzbezeichnung	VDLUFA-Methodenbuch Amtliche Methode, Kapitel:
Trockenmassegehalt	TM	3.1
Rohasche	XA	8.1
Rohfaser	XF	6.1.1
Säure-lösliche Faser	ADF	6.5.2
Neutral-lösliche Faser	NDF	6.5.1
Rohfett	XL	5.1.1
Stärke	XS	7.2.1

Mikrobiologie:

Der Besatz an Gesamt-Milchsäurebakterien wurde auf einem nicht selektiven MSR-Agar durchgeführt. Eine Differenzierung der MSB ist somit nicht möglich. Hefen und Schimmelpilzbesatz wurde auf einem YGC-Agar durchgeführt.

Statistische Auswertung:

Die Angaben des Mittelwertes erfolgen auf Grundlage der Berechnung des arithmetischen Mittels nach Formel 9.

Formel 9: Berechnung des arithmetischen Mittels

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Die Abweichungen der Messgrößen vom Mittelwert werden als Standardabweichung angegeben und nach Formel 10 berechnet.

Formel 10: Berechnung der Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

Mittelwertsvergleiche wurden als t-Test durchgeführt.

3.2 Lagerung unter Luftsauerstoffeinfluss

Die Lagerung der Silagen unter Luftsauerstoffeinfluss erfolgt nach dem System „Völkenrode“. Die messtechnisch einfach zu realisierende Temperaturmessung im Probegut ist Grundlage zur rechnerischen Bestimmung der Trockenmasseverluste unter Luftsauerstoffeinfluss (HONIG, 1999).



Abbildung 10 Lagerung der Silageproben in Thermo- behältern in der Wärmekammer

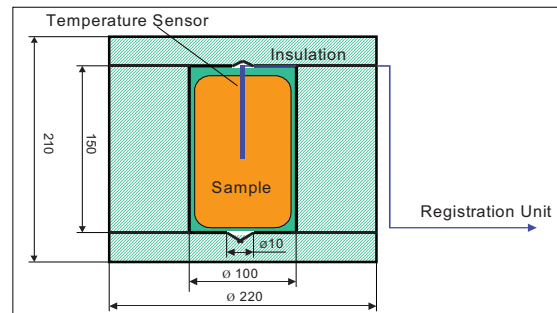


Abbildung 11 Abmessungen der Thermo- behälter mit Temperatursensor im geometrischen Mittel der Probe

Die Protokollierung der Temperaturentwicklung der einzelnen Thermobehälter erfolgte mittels Temperaturfühler (Pt100) und Datenlogger (Eltek Squirrel Meter/Logger 1000Series) mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 2 Stunden. Der lineare Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung und CO₂-Produktion erlaubt es, die Trockenmasseverluste über den stöchiometrischen Zusammenhang der Respirationsgleichung zu berechnen. Für jeden Bilanzzeitpunkt innerhalb der aeroben Stabilität erfolgte die Bestimmung als 4-fach-Ansatz. Je Behandlung werden somit mindestens 12 Dosen eingesetzt.

Die Temperaturentwicklung innerhalb einer Silageprobe ist abhängig von Probenfeuchte, Probemenge und Isolierung. In Silagen mit geringer Trockenmasse kann der Wassergehalt als Wärmesenke dienen und durch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit den Temperaturanstieg unterdrücken. Die von Honig gegebenen Umrechnungsfaktoren beziehen sich explizit auf das Testsystem Völkenrode (HONIG, 1975, 1985 & 1999). Die Berechnung der Trockenmasse-Verluste erfolgt mittels eines Excel-Arbeitsblattes.

3.3 Bestimmung Methanertrag

Die Methanertragsbestimmung erfolgte im GRW-Batch-Test (FRITZ, 2008). Probeneinwaage und Durchführung der Batch-Versuche wurden nach VDI-Richtlinie festgelegt (VDI 4630, 2004). Die Gasertragsbestimmung wurde unter mesophilen Temperaturbedingungen (38°C) vorgenommen. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage findet sich in FRITZ (2008). Gegenüber anderen Systemen zeichnet sich das Verfahren durch die Fermentergröße und den damit möglichen Frischmasseeinwaagen aus. Auf eine Probenaufbereitung kann im Gegensatz zu anderen Testsystemen verzichtet werden (HELFERICH & OECHSNER, 2003), (FRITZ, 2008).

Da für den Batch-Ansatz eine Frischmasse-Einwaage von 300g gewählt wurde, unabhängig der Massenreduktion durch vorherige Verfahrensschritte, wurden die ermittelten Methanerträge auf die durch Nacherwärmung reduzierten Massen umgerechnet. Als Inoculum wurde Faulschlamm der kommunalen Kläranlage Lübeck genutzt. Die Gütebestimmung des Versuchsansatzes erfolgte durch eine 3-fach-Bestimmung des Methanertrages mikrokristalliner Cellulose bei jedem Versuchsansatz.

3.4 Bilanzrahmen „Silierung – aerobe Stabilität – Gasertrag“

Die Verluste innerhalb der Prozesskette Ernte, Konservierung, Auslagerung und der eigentlichen Biogaszeugung setzen sich aus systemimmanenten Verlusten und Verlusten durch suboptimale Verfahren/ Verfahrensdurchführung zusammen. Ziel des gewählten Versuchsaufbaues ist es, im ersten Schritt den Einfluss der Auslagerung bzw. der aeroben Zwischenlagerung der Silage auf die Biogasausbeute zu bilanzieren. Im zweiten Schritt soll der Einfluss eines heterofermentativen Siliermittels unter Berücksichtigung der Gärgasverluste bilanziert werden.

Zur Bilanzierung der verschiedenen Einflussfaktoren (Silierung, Nacherwärmung) werden im Weiteren drei Bilanzzeitpunkte für die Auswertung der ermittelten Gaserträge eingeführt. Die Festlegung erfolgt nach den in der Praxis üblichen Verfahrensschritten Ernte (I), Konservierung (II), Lufteinfluss (III) (Abbildung 12). Bewertungsgrundlage ist der Methanertrag der unterschiedlichen Bilanzzeitpunkte. Die in den einzelnen Verfahrensschritten auftretenden Verluste werden, durch Bestimmung der Massendifferenz vor und nach dem jeweiligen Verfahrensschritt, erfasst, als prozentualer Frischmasseverlust dargestellt und in der weitergehenden Bilanzierung berücksichtigt. Die ermittelten Frischmasseverluste werden den jeweiligen Trockenmasseverlusten gegenübergestellt und diskutiert.

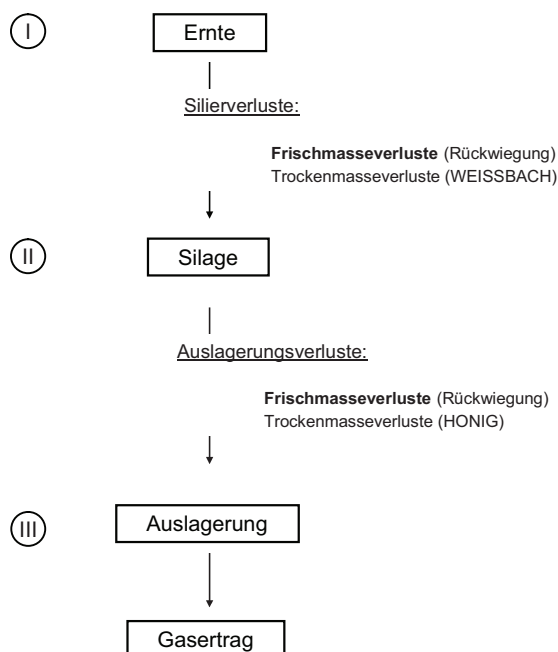


Abbildung 12 Bilanzweg der Silierversuche mit den berücksichtigten Verlustarten; Verluste in Fettdruck bei Bilanzierung berücksichtigt, Verluste in Normaldruck zur Kontrolle

Die Bestimmung des Gasertrages erfolgt für die Materialien nach der Silierung (Bilanzzeitpunkt II), sowie bei den Materialien mit Lufteinfluss zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc. Der Methanertrag wird auf den Trockenmassegehalt nach der Silierung bezogen und in $L_N \text{ CH}_4 \bullet \text{kg}^{-1} \text{ TM}_k$ angegeben. Die Berücksichtigung der Silierverluste und der Verluste durch Nacherwärmung erfolgt als Frischmasseverluste.

Abbildung 13 zeigt den schematischen Versuchsaufbau für die Silierversuche 1, 3 und 4. Bei diesen drei Silierversuchen erfolgte nach 90tägiger Silierung eine Poolung der in 5-facher Wiederholung angelegten Silagen. Die Bestimmung der Gärqualität sowie der Nährstoffanalytik erfolgte aus dem gepoolten Material. Die Gärqualität der Silagen aus den Silierversuchen 2 und 5 wurden für jeden Silierbehälter einzeln ermittelt.

Die Bestimmung der Methanerträge der unterschiedlichen Bilanzzeitpunkte (II, IIIb, IIIc) erfolgte für jeden Silierversuch in einem eigenständigen Batch-Versuch. Die Wiederholungen im Batch-Ansatz erfolgten für den Bilanzzeitpunkt II immer mit $n=4$, auf Grund der Massenreduktion während der Nacherwärmung wurde für die Bilanzzeitpunkte IIIb und IIIc eine 3-fach-Bestimmung vorgenommen.

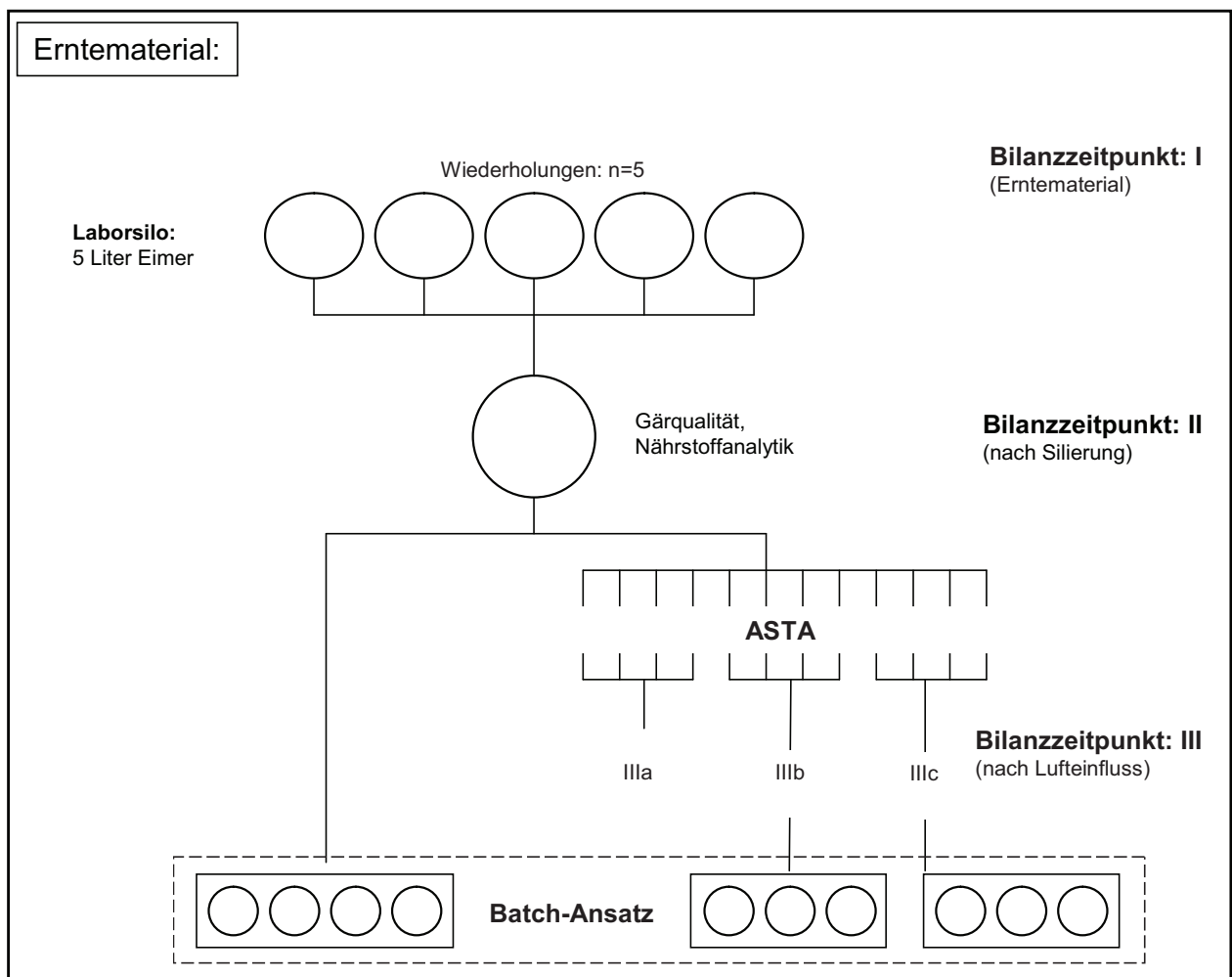


Abbildung 13 Versuchsaufbau der Bilanzierungsversuche

3.4.1 Silierverluste

Silierverluste setzen sich aus verschiedenen Verlustgrößen zusammen und unterliegen in der Praxis großen Schwankungen. Methodisch bedingt können mit der vorliegenden Arbeit nur Gärgasverluste als Silierverluste erfasst werden. Verfahrensabhängige Verlustgrößen wie Sickersaft, verzögerte Anaerobiose wurden nicht erfasst.

Die Erfassung der Gärgasverluste erfolgt aus der Massendifferenz vor und nach Einlagerung und wird in Prozent Frischmasse angegeben

Formel 11 FM-Verluste durch Gärgasbildung (GV = Gärgasverluste)

$$GV [\% FM] = 100 \cdot \frac{FM - \text{Differenz} [g]}{FM - \text{Einwaage} [g]}$$

Die Bestimmung der Trockenmasseverluste erfolgt nach WEISSBACH (1995) aus der Massendifferenz vor und nach Einlagerung sowie dem Trockenmassegehalt und einem Anteil gelöstem CO₂ in der Silage (Formel 12). Die Berücksichtigung eines Anteils gelösten CO₂ in der Silage erfolgt aus einer Arbeit nach BERG (1971) und stellt eine empirische Größe dar.

Formel 12 TM-Verluste durch Gärgasverluste nach WEISSBACH (1995)

$$GV [\% TM] = 100 \cdot \frac{FM - \text{Differenz} [g]}{TM - \text{Einwaage} [g]} + 2,5$$

Es ist zu erwarten, dass durch den Einsatz eines heterofermentativen Siliermittels die Gärgasverluste höher als bei der unbehandelten Kontrolle ausfallen. Dies wird durch Ermittlung der Gewichts­differenz vor und nach Silierung erfasst und sowohl bei der Angabe der Gärgasverluste in FM-Verluste als auch in TM-Verluste berücksichtigt. Die Berechnung der Gärverluste in %-TM erfolgt innerhalb eines Silierversuches mit dem gleichen Trockenmassegehalt des Ausgangsmaterials. Die Addition von 2,5 infolge CO₂-Löslichkeit erfolgt unabhängig einer möglichen Siliermittelbehandlung, so dass Unterschiede im Trockenmasseverlust nur aus unterschiedlichen Frischmassedifferenzen resultieren. Es wurden für alle Silierversuche Bilanzrechnungen zur Verifizierung der Trockenmasse-Silierverluste aufgestellt (Tabelle 47-Tabelle 54, Anhang). Die Abweichungen zwischen gemessenem Trockenmassegehalt nach der Silierung und den aus Trockenmassebestimmung des Erntematerials und dem Trockenmasse-Abzug nach Formel 12 variieren zwischen – 2,8 und +14,8 % (Tabelle 55, Anhang). Unterschiede können aus der Schwankungsbreite der Trockenmassebestimmung und den potentiellen Ungenauigkeiten der jeweiligen Korrekturfunktionen resultieren. Die Darstellung der TM-Verluste erfolgt der Vollständigkeit halber, für die Bilanzrechnung werden die Frischmasseverluste berücksichtigt.

3.4.2 Verluste durch aerobe Lagerung

Zur Ermittlung zeitlicher Verläufe der stofflichen und energetischen Veränderung der Silage unter Luftsauerstoffeinfluss ist Bilanzzeitpunkt III in 3 Unterzeitpunkte differenziert. Die Einteilung dieser Unterzeitpunkte wurde in Abhängigkeit der Temperaturentwicklung im HONIG-Test vorgenommen und ist somit silageabhängig und über die unterschiedlichen Bilanzversuche variabel. Zeitpunkt IIIa ist bei Eintritt der aeroben Instabilität terminiert, IIIb nach Abklingen des ersten Temperatur-Maximums und IIIc nach dem zweiten Temperaturmaximum (Abbildung 14). Die genauen Zeitpunkte der Entnahmen unterliegen Schwankungen, die aus einer geringen Streuung des Temperaturverlaufs der einzelnen Dosen oder aus einer unbemerkten Temperaturentwicklung resultieren können.

Zur Bestimmung des Einflusses der Nacherwärmung auf die Methangasbildung werden die Massenreduktionen durch Nacherwärmung als HONIG-Verluste aus der Temperaturerwärmung berechnet (HONIG 1999) sowie als Gewichtsverluste in % FM, aus den Massendifferenzen vor und nach Erwärmung, berechnet (Formel 13).

Formel 13 Berechnung der prozentualen Gewichtsverluste durch Auslagerung der Silage

$$\text{Gewichtsverluste [\%]} = \frac{\text{MD (Einwaage - Auswaage)}}{\text{Einwaage}} \cdot 100$$

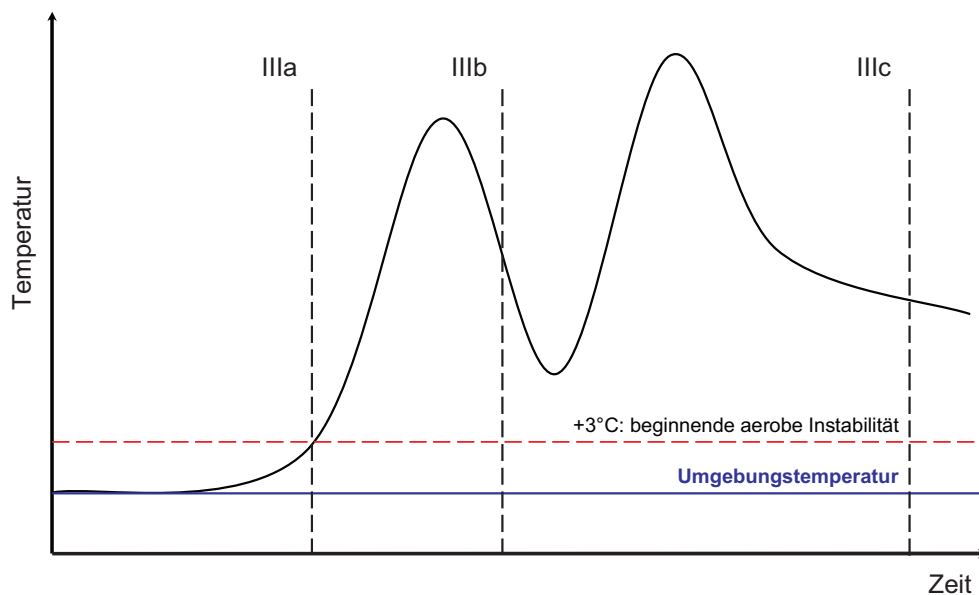


Abbildung 14 Bilanzzeitpunkte in Abhängigkeit des Temperaturverlaufs

3.5 Silagegärprodukte in der Biogasgestehung

Die Ermittlung der Abbauwege und Abbaugrade verschiedener Kohlenstoffquellen erfolgt mittels Batch und Fed-Batch-Versuchen unter mesophilen Temperaturbedingungen. Die Ermittlung der Abbaugrade erfolgte in 60 Liter Batch-Ansätzen, die Ermittlung der Abbauwege wurde in 2 Liter Batch-Ansätzen durchgeführt (Tabelle 19). Als Kohlenstoffquellen wurden Milchsäure und Essigsäure eingesetzt, als die beiden Hauptunterscheidungsmerkmale der heterofermentativen Silierung sowie Propionsäure und Glucose. Propionsäure gilt als Indikator für einen gestörten Biogasprozess. Als Kontrollvariante wurde Glucose zugesetzt (Tabelle 20).

Tabelle 19 Versuchsdesign der Zufütterungsversuche

Substratzugabe / Versuchssystem	Batch-Versuch	Fed-Batch I	Fed-Batch II
60 Liter Batch-Fermenter	Gasertrag Abbauwege	Gasertrag Abbauwege	
2 Liter SCHOTT®-Flasche	-		Abbauwege



Abbildung 15 Zufütterungsöffnungen und Probenahmehahn am 60 Liter Batch-Fermenter, 2 Liter SCHOTT®-Flasche mit 3-Port Anschlussystem

Die Fütterung der 60 Liter Fermenter erfolgt mittels Spritzensystems durch eine selbstschließende Verbindung. Die Probenahme für die Gärsäureanalytik wurde nach einem 10 minütigen Rührintervall durchgeführt.

Tabelle 20 Eingesetzte Kohlenstoffquellen und Mengen

Substrat	Batch-Versuch [g]	Fed-Batch-Versuch I [g / Tag]	Fed-Batch-Versuch II [g / Tag]
Milchsäure	20 g.	2	1,5
Essigsäure	20 g.	2	1,6
Propionsäure	20 g.	2	1,2
Glucose	20 g.	2	1,9

Batch Versuche:

Die einmalige Substratzugabe erfolgte mit einer definierten Menge des Substrates (Tabelle 20). Im Rahmen der 10-tägigen Laufzeit des Versuches wurde täglich 30 ml Flüssigkeit zur Gärssäureanalytik aus dem Fermenter entnommen. Als Inoculum wurde analog dem GRW-Batch-Versuch, Faulschlamm der kommunalen Kläranlage Lübeck genutzt.

Fed-Batch-Versuche:

Auf Grund der unterschiedlichen Dichten der eingesetzten Kohlenstoffquellen ergeben sich bei der Fed-Batch-Untersuchung unterschiedliche Fütterungsmengen da bei der täglichen Zugabe jeweils eine konstante Menge von 1,2 ml appliziert wurde (Tabelle 20). Alle Substrate wurden in 3-fach Wiederholung angesetzt. Die Zufütterung erfolgte semi-kontinuierlich an 5 Tage je Woche (Montag – Freitag). Jeweils Montag, Mittwoch und Freitag wurden Proben zur Gärssäureanalytik entnommen und die Fermenter mit einer äquivalenten Wassermenge wieder befüllt. Die Laufzeit des Versuches beträgt 26 Tage. Die mittlere Verweilzeit mit 80 Tagen liegt im Rahmen üblicher Landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Die Raumbelastung B_R liegt bei allen Substraten unterhalb von 1 und kann somit als schwachbelastet gelten. Als Inoculum wurde Faulschlamm der Kläranlage Rostock genutzt. Eine Gasfassung erfolgte nicht.

4 Ergebnisse

4.1 Bilanzierungssilagen

Das Ausgangsmaterial der Bilanzversuche wurde im Rahmen der Ernte von fünf Praxisbetrieben bezogen. Zwischen Ernte und Silierung lagen in allen Fällen weniger als 4 Stunden. Erntetermin sowie Häcksellänge wurden vom Praxisbetrieb festgelegt und sind als praxisüblich zu charakterisieren. Der für Mais aus siliertechnischer Sicht anzustrebende Rohfasergehalt von <20 % TM wurde nicht in allen Silagen erreicht (HERTWIG, 2004).

Tabelle 21 Kenngrößen des Ausgangsmaterials (Silomais)

Parameter		SV 1	SV 2	SV 3	SV 4	SV 5
TS	% FM	25,7	35,3	29,9	31,2	33,2
Rohasche	% TM	2,9	3,8	3,6	n.b.	3,9
Rohfaser	% TM	23,9	19,1	21,9	n.b.	n.b.
ADF	% TM	25,9	19,2	26,4	n.b.	n.b.
NDF	% TM	48,3	40,7	52,8	n.b.	n.b.
Rohfett	% TM	2,1	2,7	n.b.	n.b.	n.b.
Stärke	% TM	21,3	34,9	n.b.	n.b.	n.b.
Zucker	% TM	7,9	5,6	9,9	8,3	12,5
Saccharose	% TM	1,5	2,0	4,5	n.b.	n.b.
Glucose	% TM	2,9	1,4	2,5	n.b.	n.b.
Fructose	% TM	3,4	2,1	2,9	n.b.	n.b.

n.b. = nicht bestimmt, n.n. nicht nachweisbar

Tabelle 22 Mikrobiologische Untersuchungen des Ausgangsmaterials

Parameter		SV 1	SV 2	SV 3	SV 4	SV 5
Hefen	KbE/g FM	1,6E+06	1,4E+05	8,0E+04	2,2E+06	7,3E+04
Schimmel	KbE/g FM	1,0E+04	1,7E+06	5,0E+04	7,0E+04	2,1E+02
MSB gesamt	KbE/g FM	9,6E+05	2,5E+05	8,6E+05	2,7E+05	1,8E+05

4.1.1 Gärgas-Verluste

Der Einsatz des heterofermentativen Siliermittels führte zu leicht erhöhten Gärgasverlusten, die aber nicht in allen Versuchen statistisch signifikant sind (Tabelle 23).

Tabelle 23 Die Silierverluste der heterofermentativen Silage (Beh.) liegen geringfügig über der unbehandelten Kontrolle (Kon.)

Parameter	SV 1		SV 2		SV 3		SV 4		SV 5	
	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.
FM-Verl. [%] ¹⁾	1,2 ^a ± 0,1	1,9 ^b ± 0,0	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	0,8 ^a ± 0,5	1,7 ^b ± 0,1	1,1 ^a ± 0,2	1,4 ^b ± 0,0	1,1 ± 0,2	1,3 ± 0,0
TM-Verl. [%] ^{1) 2)}	7,3 ^a ± 0,2	9,8 ^b ± 0,1	6,0 ± 0,4	6,3 ± 0,2	3,8 ^a ± 0,9	5,6 ^b ± 0,8	6,1 ^a ± 0,5	6,8 ^b ± 0,1	5,7 ± 0,6	6,5 ± 0,1

1) unterschiedliche Hochbuchstaben zeigen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ statistische Unterschiede zwischen den Mittelwerten über die Varianzursache Behandlung innerhalb eines Silierversuchs

2) Berechnet nach WEISSBACH (1995)

Tabelle 24 Trockenmassegehalt und Gärgasverluste der Laborsilagen:

Parameter	SV 1	SV 2	SV 3	SV 4	SV 5
TM Ausgangsmaterial [%]	25,7	35,3	29,9	31,2	33,2
Gärverlust-Differenz Kon. / Beh. [%-FM]	0,7 ^{s.}	0,04 ^{n.s.}	0,9 ^{s.}	0,3 ^{s.}	0,2 ^{n.s.}
Gärverlust-Differenz Kon. / Beh. [%-TM] ¹⁾	2,5 ^{s.}	0,3 ^{n.s.}	1,8 ^{s.}	0,7 ^{s.}	0,78 ^{n.s.}

n.s.= nicht signifikant zwischen den Behandlungen, s.= signifikant unterschiedlich zwischen den Behandlungen bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$

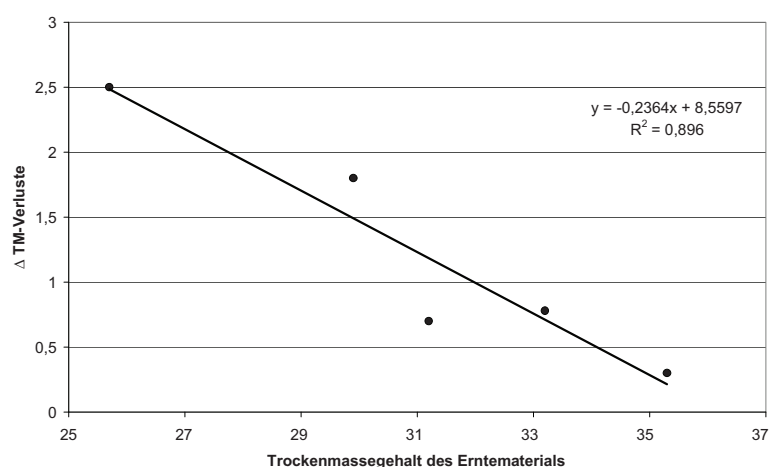


Abbildung 16 Abhängigkeit der Gärverlust-Differenz vom Ausgangstrockenmassegehalts

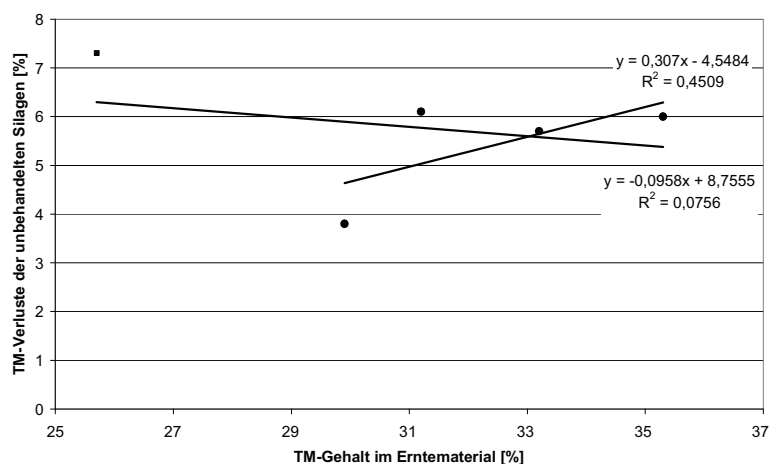


Abbildung 17 Trockenmasseverluste der unbehandelten Kontrollen in Abhängigkeit des Trockenmassegehaltes im Erntematerial

Bei Betrachtung über alle unbehandelten Silierversuche zeigen sich nur geringe Abhängigkeiten zwischen Trockenmassegehalt und der Verlusthöhe (Abbildung 17). Ohne Berücksichtigung des Verlustes von 7,3 % bei 25,7 % TM ergeben sich mit steigendem Trockenmassegehalt höhere Verluste.

4.1.2 Mikrobieller Status im Laufe der Silierung

Tabelle 25 Mikrobieller Status der Silagen nach Ende der Silierung (Tag 90)

Parameter	SV 1		SV 2		SV 4		SV 5	
	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.
Hefen KbE / g FM	2,6E+03	2,6E+03	1,2E+05	< 100	1,3E+06	< 100	4,1E+06	< 100
Schimmel KbE / g FM	< 100	5,0E+02	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
MSB	1,8E+08	3,9E+08	5,6E+8	4,1E+10	4,3E+07	3,2E+09	9,5E+08	3,0E+09

Für Silierversuch 3 konnte an Tag 90 kein mikrobieller Status erhoben werden.

Im Rahmen der Silierversuche 4 & 5 wurde die mikrobielle Entwicklung (Hefen und MSB) sowie der Gärsäuregehalt zu den Zeitpunkten Tag 11 und Tag 33 bestimmt.

Tabelle 26 Einfluss des Siliermitteleinsatzes auf den Besatz an Hefen

Parameter	SV 1		SV 2		SV 4		SV 5	
	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.
Ernte- material	1,6E+06		1,4E+05		2,2E+06		7,3E+04	
Nach Silierung	2,6E+03	2,6E+03	1,2E+05	< 100	1,3E+06	< 100	4,1E+06	< 100

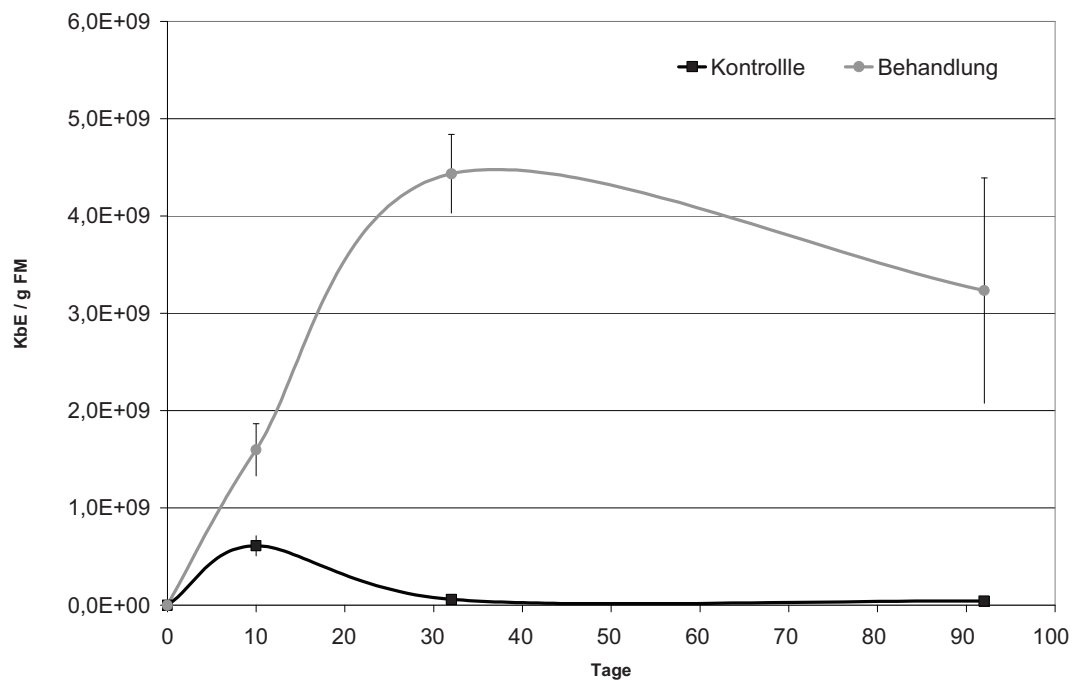
Siliverversuch 4:

Abbildung 18 Entwicklung der Gesamtmilchsäurebakterien bei SV 4

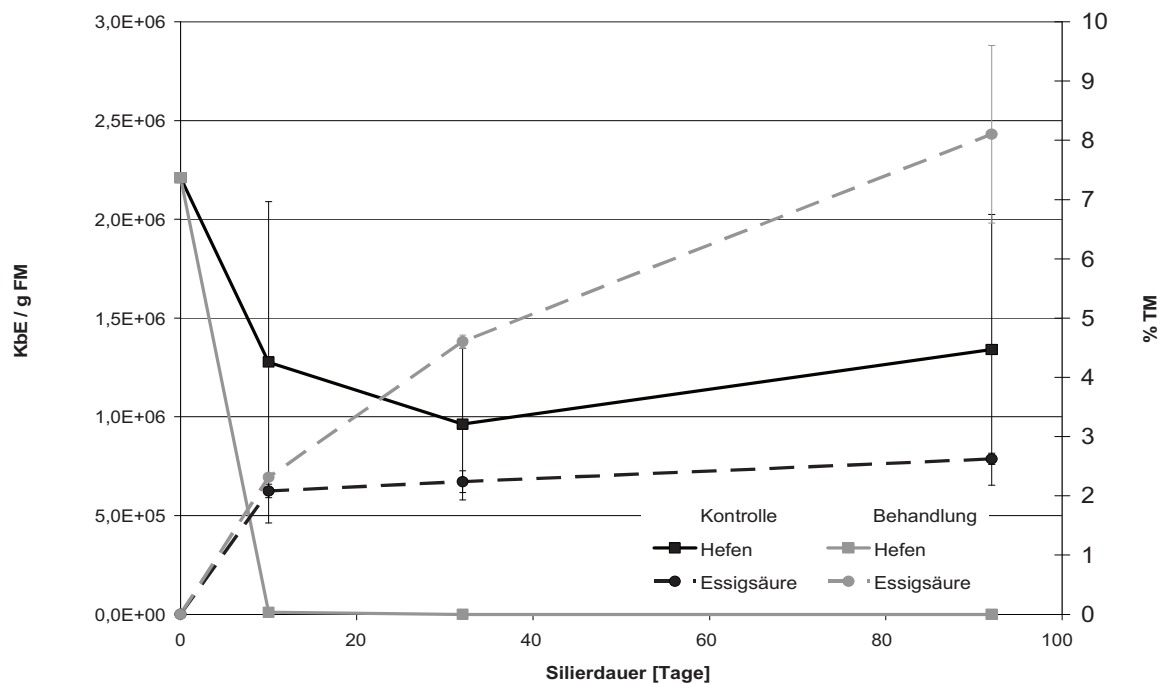
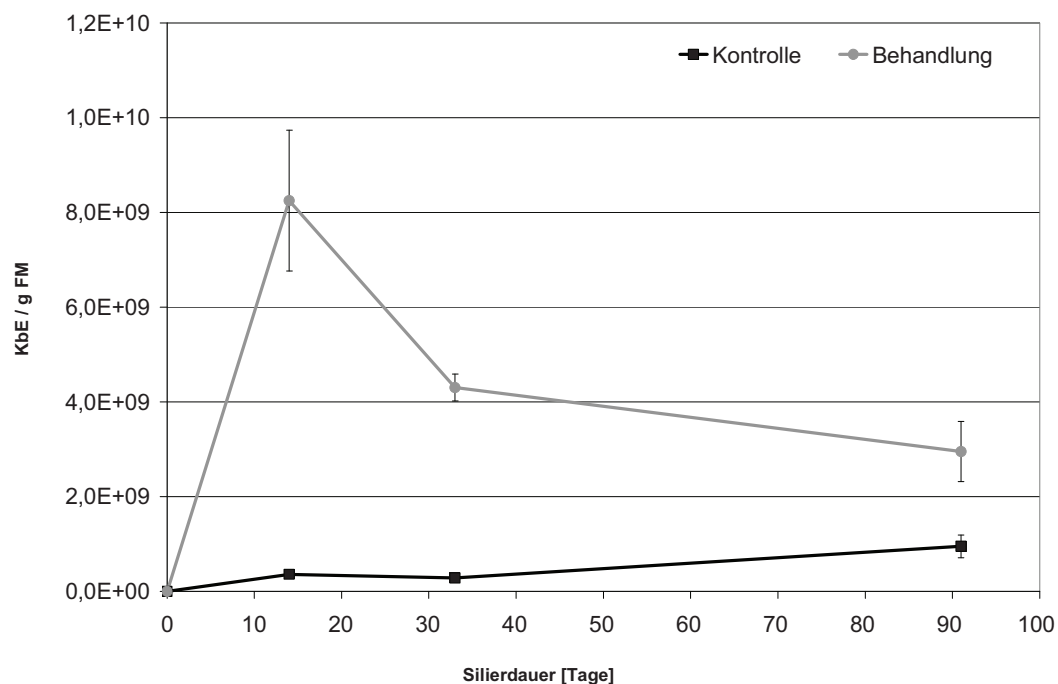
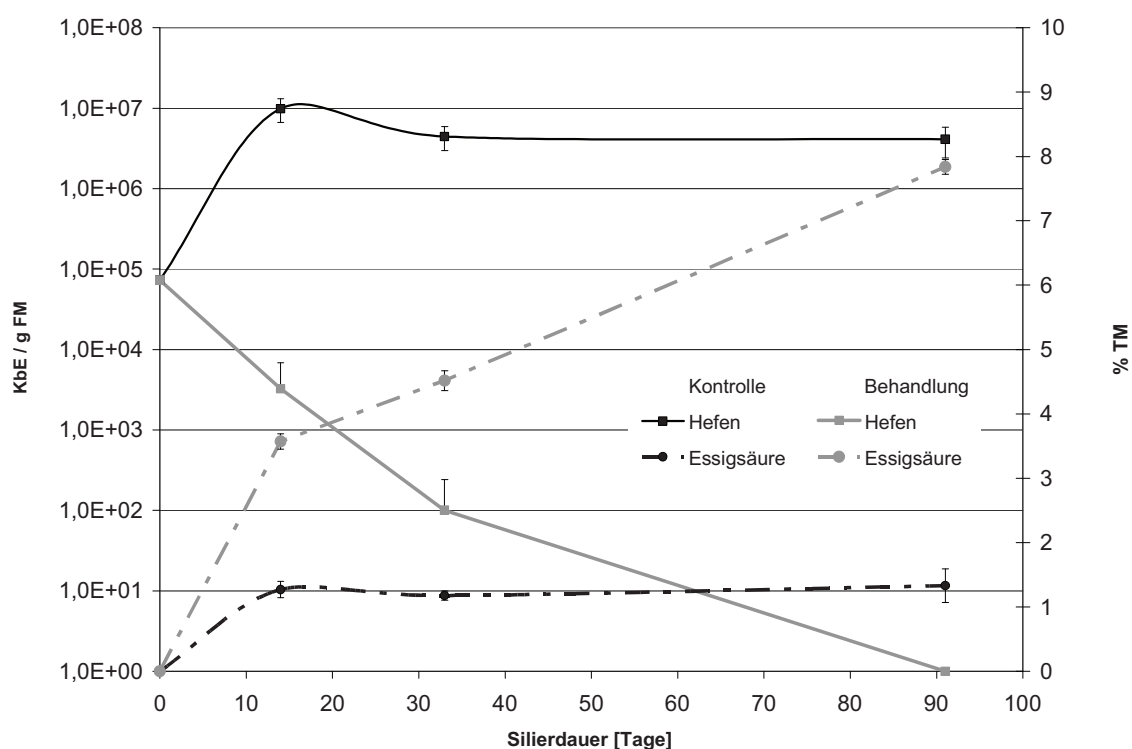


Abbildung 19 Entwicklung des Essigsäuregehaltes und der Hefenpopulation bei SV 4

Siliverversuch 5:**Abbildung 20** Entwicklung der Gesamtmilchsäurebakterienpopulation bei SV 5**Abbildung 21** Entwicklung des Essigsäuregehaltes und der Hefenpopulation bei SV 5

4.1.3 Gär säuremuster

Die Gärqualität ist bei allen Silagen als gut zu bezeichnen. Die anaerob stabile Lagerung ist mit den erzielten pH-Werten (n=5; Kon: Ø 3,8; Beh: Ø 4,2) gegeben (Tabelle 27).

Tabelle 27 Trockenmasse nach WEISSBACH (2008) korrigiert, Inhaltsstoffe, Gasausbeuten und FoTS der Laborsilagen (1,5L & 30L) unterschiedlicher Erntejahre (2007/2008) und Standorte

Maismaterial Behandlung Kenngröße	Silierversuch 1		Silierversuch 2,		Silierversuch 3		Silierversuch 4		Silierversuch 5	
	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾
Trockenmasse %	23,8	22,6	33,8±0,9	30,8±0,6	29,6	27,7	26,1	25,3	31,9±0,1	30,8±0,4
Trockenmasse _{kor} %	25,6	25,3	35,3	33,8	31,2	30,4	27,5	28,6	34,5	34,6
Gärverluste % TM ¹	7,3 ^a ±0,2	9,8 ^b ±0,1	6,0±0,4	6,3±0,2	3,8 ^a ±0,9	5,6 ^b ±0,1	6,1 ^a ±0,5	6,8 ^b ±0,1	5,7±0,6	6,5±0,1
Rohasche % TM	3,4	3,5	3,8±0,2	4,1±0,2	3,7	3,9	4,7	4,7	3,9	3,9
Rohprotein % TM	7,3	7,1	n.b.	n.b.	7,7	7,4	8,4	8,3	n.b.	n.b.
Stärke % TM	25,6	26,1	33,5	32,3	28,6	33,1	30,3	33,1	n.b.	n.b.
Rohfaser % TM	27,3	28,7	20,8±0,8	21,9±1,2	22,7	23,0	19,9	21,6	n.b.	n.b.
Rohfett % TM	2,6	2,9	n.b.	n.b.	2,67	2,9	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NDF % , TM	55,2	51,8	42,2±1,6	45,3±3,9	47,7	52,6	44,1	44,7	n.b.	n.b.
ADF % TM	30,5	31,1	21,7±0,4	23,9±1,6	25,9	25,6	22,5	24,8	n.b.	n.b.
Hemicellulose % TM	24,7	20,7	20,5	21,4	21,8	27	21,6	19,9	n.b.	n.b.
Gasbildung aus (FoTS) CH ₄ LN / kg TM _{kor}	312	306	337	332	330	328	337	331	n.b.	n.b.

Fußnote für Tabelle 22+23: ¹⁾ Unterschiedliche Hochbuchstaben zeigen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ statistische Unterschiede zwischen den Mittelwerten über die Varianzursache Behandlung an, ²⁾ Kon. = unbehandelte Kontrolle, ³⁾ Beh. = Kombinationsprodukt aus homo- heterofermentativen Milchsäurebakterien

Tabelle 28 Kenngrößen der Gärqualität (Gärsäuren, Alkohole, und Verluste in % der TM_k ; aerobe Stabilität in Stunden)

Maismaterial	Silierversuch 1		Silierversuch 2,		Silierversuch 3		Silierversuch 4		Silierversuch 5	
Behandlung Kenngröße	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾	Kon. ²⁾	Beh. ³⁾
pH 90. Tag	3,6	4,2	3,9 ± 0,0	4,2 ± 0,0	3,8	4,2	4,0	4,2	3,8 ± 0,1	4,1 ± 0,0
Milchsäure % $TM_{korr}^{1)}$	7,2	1,1	5,8 ± 0,3	n.n.	6,4	1,5	4,9	2,0	5,0 ± 0,7	0,5 ± 0,0
Essigsäure % $TM_{korr}^{1)}$	3,9	6,6	3,5 ± 0,3	8,6 ± 0,0	2,6	5,7	3,0	6,7	1,3 ± 0,3	7,8 ± 0,1
Buttersäure % $TM_{korr}^{1)}$	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
1,2-Propandiol % $TM_{korr}^{1)}$	0,2	n.n.	n.n.	0,2 ± 0,0	1,6	3,3	0,2	3,9	0,78 ± 0,2	2,2 ± 0,2
Ethanol % $TM_{korr}^{1)}$	1,6	2,2	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3	0,9	1,8	1,0	1,8 ± 0,0	0,8 ± 0,2
MS / ES % $TM_{korr}^{1)}$	1,8	0,2	1,6	0	2,5	0,3	1,6	0,3	3,8	0,06
Aerobe Stabilität $h^{1)}$	62	76	22	116	146	>280	29	>198	17	>258

4.2 Einfluss der aeroben Lagerung

4.2.1 Temperaturverlauf

Der Einfluss der heterofermentativen Silierung zeigt sich deutlich in einer erhöhten aeroben Stabilität. Drei behandelte Silagen erwiesen sich als äußerst aerob stabil und zeigten im gesamten Untersuchungszeitraum (280 Std., 198 Std., 258 Std.) keine Erwärmung. Die Dauer bis zur Erwärmung der Silage um + 3°C gegenüber der Umgebungstemperatur wurde durch den Einsatz des heterofermentativen Siliermittels, bei den beiden anderen Silagen, um 14 Std. bzw. um 94 Std., gegenüber den jeweiligen Kontrollsilagen, signifikant erhöht. Zwei Kontrollsilagen waren mit 17 und 22 Std. aerob sehr instabil (Tabelle 30). Silierversuch 5 mit 17 Std. aerober Stabilität, wies hierbei auch die höchste Hefendichte mit $4,1E+06$ zum Öffnungstag 90 auf (Tabelle 29). Bei Silierversuch 3 konnte zum Tag 90 kein mikrobieller Status bestimmt werden.

Von den behandelten Silagen zeigte nur Silierversuch 1 im Untersuchungszeitraum von 12 Tagen einen erwärmungstypischen Temperaturverlauf. Gegenüber der Kontrollsilage beeinflusste die heterofermentative Behandlung die aerobe Stabilität nur leicht, es stellte sich aber eine geringere Ausprägung des Temperaturverlaufes ein. Die Temperaturkurve der behandelten Silage zeigt nicht nur eine Parallelverschiebung um den Zeitraum der verbesserten aeroben Stabilität, sondern auch einen langsameren Anstieg bis zum ersten Temperaturmaximum (Abbildung 22). Nach Bruch der aeroben Stabilität erwärmte sich Kontrollsilage Silierversuch 1 innerhalb von 13 Std. bis zum Temperaturmaximum 1. Resultierend aus dem geringeren Temperaturanstieg der behandelten Silage stellte sich das erste Temperaturmaximum erst 51 Stunden nach Bruch der aeroben Stabilität ein.

Gleiches gilt mit geringer Ausprägung auch für SV 2 mit 22 Std. bei Kontrolle und 26 Std. bei behandelter Silage. Die Kontrollsilage im Silierversuch 3 zeigte während der gesamten Lagerzeit nur einen geringen Anstieg der Temperatur.

Tabelle 29 Hefenbesatz am Öffnungstag 90 und die aerobe Stabilität der Kontrollsilagen sowie TM-Verluste der Praxissilagen

Silierversuch / Parameter	Laborsilagen				
	SV 1	SV 2	SV 3	SV 4	SV 5
Hefen KbE / g FM	$2,6E+03$	$1,2E+05$	n.b.	$1,3E+06 \pm 6,9E+05$	$4,1E+06$
ASTA [h]	62	22	146	29	17
	Praxissilagen				
	1	2	3	4	5
Hefen [KbE / g FM]	< 100	$1,9E+03$	< 100	< 100	$2,79E+07$
TM-Verluste [%]	4,0	11,4	0,5	4,1	11,9

Tabelle 30 Temperaturverlauf bei Raumtemperatur 20°C: signifikante Verbesserung der aeroben Stabilität (+3°C gegenüber Umgebungstemperatur) und über den Zeitraum geringere Erwärmung bei den behandelten Silagen

	Aerobe Stabilität ¹⁾ [Stunden]	Temperatur Maximum 1 ¹⁾ [°C]	Zeitpunkt Maximum 1 ¹⁾ [Std.]	Temperatur Maximum 2 ¹⁾ [°C]	Zeitpunkt Maximum 2 ¹⁾ [Std.]	Δ [Std.] Max. 1 – Max. 2
Silierversuch 1						
Kon.	62 ^a	38 ^a	76 ^a	35 ^a	188 ^a	118
Beh.	76 ^b	34 ^b	132 ^b	33 ^b	274 ^b	142
Silierversuch 2						
Kon.	22 ^a	37	38 ^a	36	116	78
Beh.	116 ^b	37	180 ^b	-	-	
Silierversuch 3						
Kon.	146	25	172	26	280	108
Beh.	>280	-	-	-	-	
Silierversuch 4						
Kon.	29	39	76	43	181	105
Beh.	>198					
Silierversuch 5						
Kon.	17	43	46	41	166	120
Beh.	>258	-	-	-	-	
Sorghum I						
Kon.	72	30	94	25,4	174	80
Beh.	>286	-	-	-	-	
Sorghum II						
Kon.	108	31,3	154	26,6	258	104
Beh.	>286	-	-	-	-	
Durchschnitt Maissilage						
Kon.	49±50	36±7	85±57	37±7	187±59	106±19
Durchschnitt Sorghumsilage						
Kon.	90±26	31±1	124±42	26±1	216±59	92±17

¹⁾Unterschiedliche Hochbuchstaben zeigen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ statistisch abgesicherte Unterschiede im zeitlichen Auftreten der Temperaturereignisse zwischen den Behandlungen der jeweiligen Silierversuche.

In Tabelle 31 ist die Dauer der aeroben Exposition für den jeweiligen Silierversuch und Bilanzzeitpunkt angegeben.

Tabelle 31 Bilanzzeitpunkte während der aeroben Stabilität. Angaben in Stunden.

Bilanzzeitpunkt/ Silage	IIIa	IIIb	IIIc
Silierversuch 1	92	142	288
Silierversuch 2	52	90	160
Silierversuch 3	k.E.	k.E.	280
Silierversuch 4	48	96	198
Silierversuch 5	k.E.	100	258
Sorghum I	-	-	278
Sorghum II	-	-	278

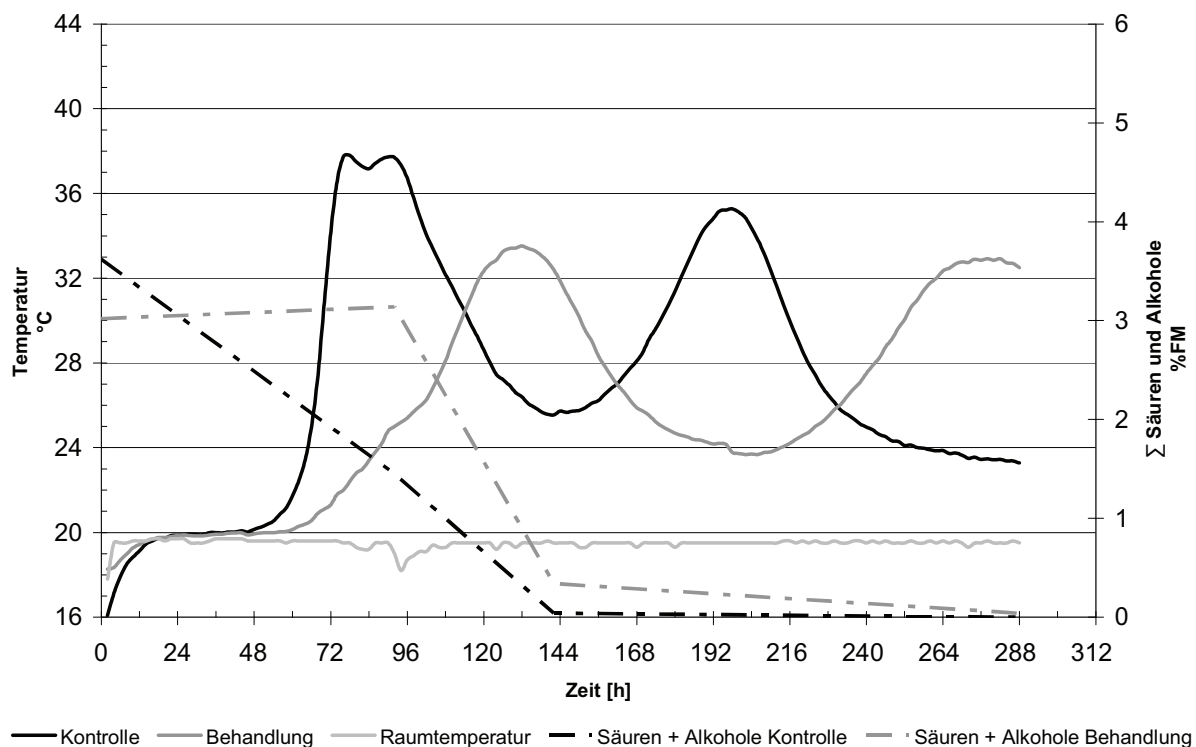


Abbildung 22: Silierversuch 1: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test

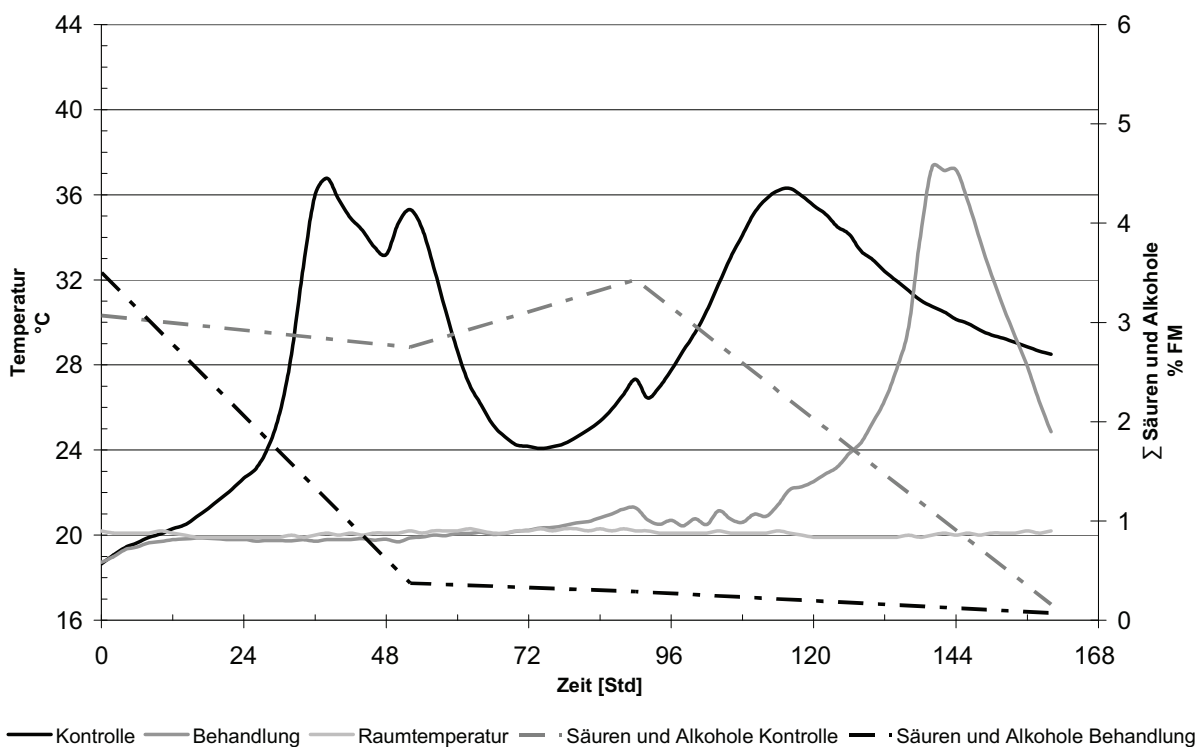


Abbildung 23: Silierversuch 2: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test

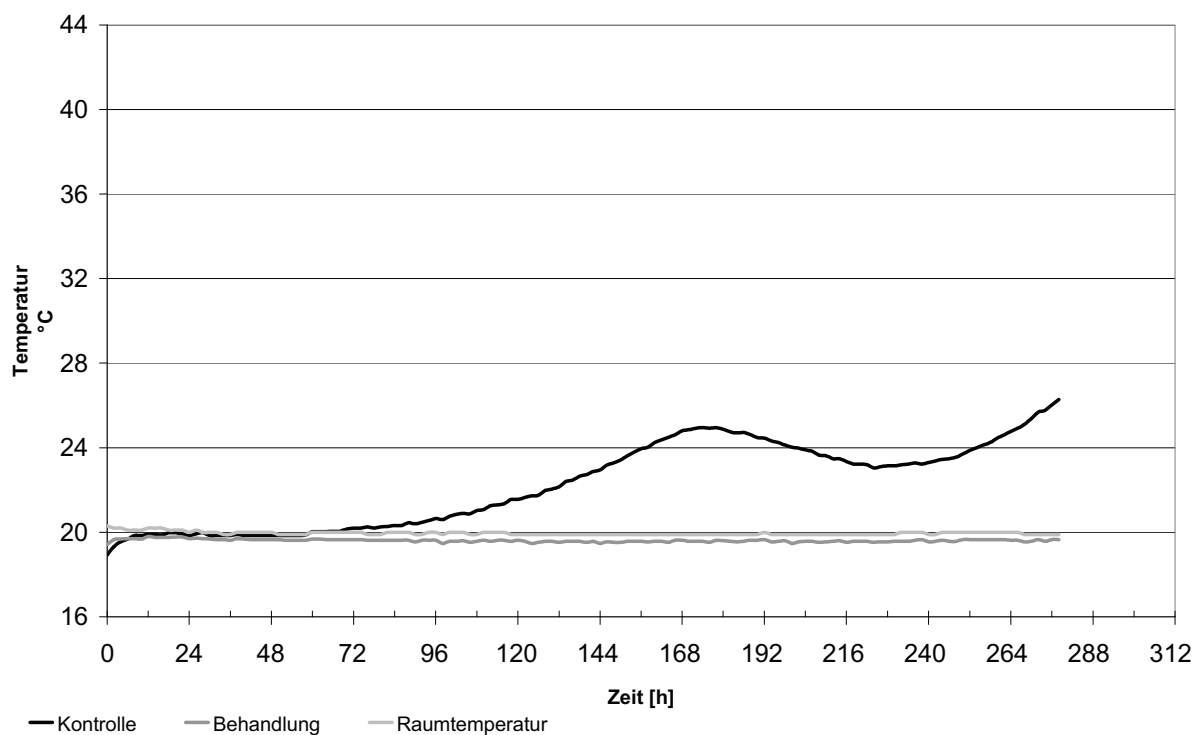


Abbildung 24: Silierversuch 3: Temperaturverlauf im HONIG-Test



Abbildung 25: Silierversuch 4: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test

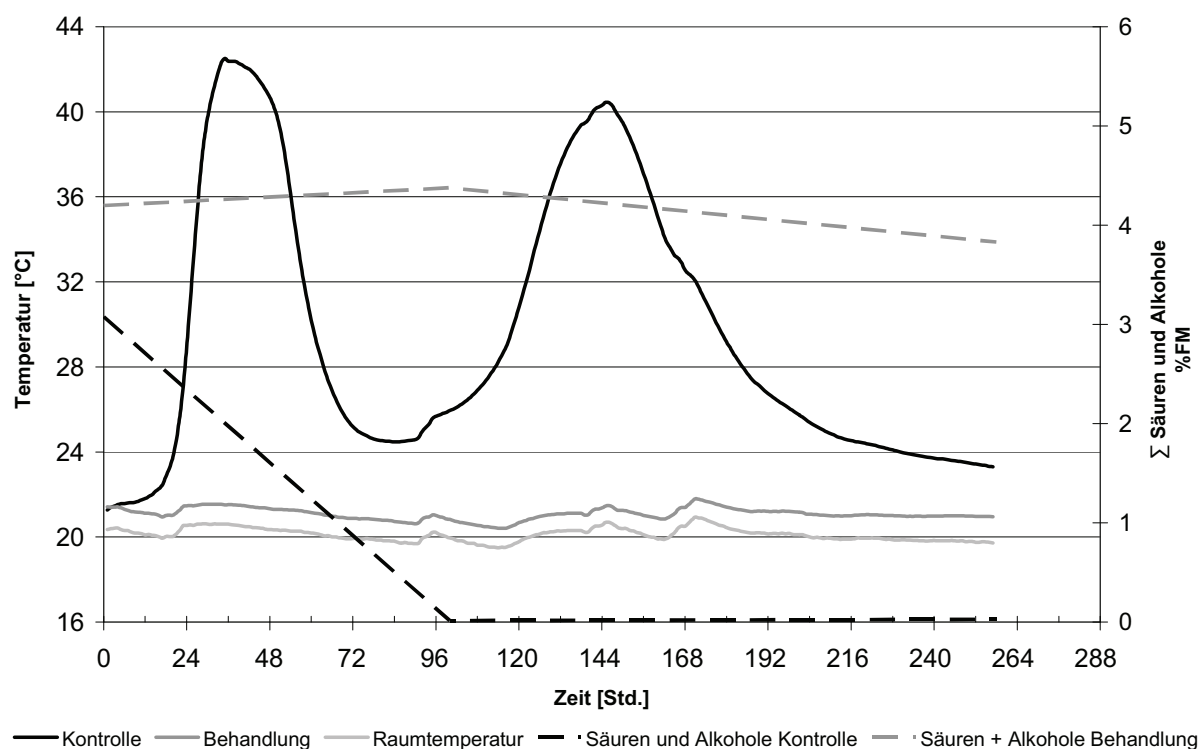


Abbildung 26 Silierversuch 5: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test

4.2.2 Chemische und stoffliche Veränderungen

Durch Lagerung unter aeroben Bedingungen verändert sich die stoffliche Zusammensetzung der Silagen. Zur Bewertung des zeitlichen Verlaufes der stofflichen Veränderungen standen 4 Maissilagen zur Verfügung. Im Rahmen des Silierversuches 3 wurde die stoffliche Veränderung nur zum Bilanzzeitpunkt IIIc (11,5 Tage aerobe Lagerung) bestimmt. Bei Silierversuch 5 erfolgte die Bestimmung der stofflichen Veränderung zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc.

Deutlichste Veränderungen treten bei den Gärprodukten der unbehandelten Silage auf, die ohne Ausnahme abgebaut werden und zu einem Anstieg des pH-Wertes führen (Abbildung 27). Zum Bilanzzeitpunkt IIIa konnte teilweise nur noch die Hälfte der zum Bilanzzeitpunkt II (kein Lufteinfluss) vorliegenden Summe an Säuren und Alkoholen nachgewiesen werden (Tabelle 32). Der Gehalt zum Zeitpunkt IIIa der Kontrollsilage SV 2 war nahezu vollständig abgebaut.

4.2.2.1 Änderungen des Gärsäuremusters

Die Säuregehalte der unbehandelten Silagen bei Luftstress zeigen keine Präferenz im Abbau der Gärprodukte (Abbildung 27). Im Verlauf der Luft-Exposition kann bei Silierversuch 4 länger Essigsäure als Milchsäure nachgewiesen werden. In den Silagen Silierversuch 1 und 2 werden Milchsäure und Essigsäure fast zeitgleich abgebaut. Die Essigsäuregehalte der Kontrollsilagen liegen im Mittel bei 2,8% TM_k und sind somit offensichtlich zu gering, um den aeroben Verderb zu verhindern.

Tabelle 32 Gehalt an Säuren und Alkoholen zu den Bilanzzeitpunkten II und IIIa

Σ Säuren + Alkohole % FM / Bilanzzeitpunkt	Silierversuch 1		Silierversuch 2		Silierversuch 4	
	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.	Kon.	Beh.
II	3,6	3,0	3,5	3,1	2,8	3,9
IIIa	1,5	3,1	0,4	2,8	1,5	3,2
Veränderung [%]	41,7 %	103 %	11,4%	90,3%	53,6 %	82,1 %

Bei den Silierversuchen 3 und 5 erfolgte keine Entnahme zum Bilanzzeitpunkt IIIa

Im Gegensatz zu den unbehandelten Silagen findet in den behandelten Silagen unter aeroben Bedingungen ein Umbau und weitergehender Aufbau von Gärsäuren statt. Bis zum Bilanzzeitpunkt IIIb (Stunde 96) zeigen die behandelten Silagen ein annähernd einheitliches Bild; es erfolgt eine Reduktion der Milchsäuregehalte mit einem zeitgleichen Anstieg der Essigsäuregehalte (Abbildung 28). Einzig Silierversuch 4 zeigt auch einen Aufbau von Milchsäure wobei hier am Bilanzzeitpunkt II keine Milchsäure nachgewiesen werden konnte.

Ab Stunde 96 erfolgt in den Silagen Silierversuch 1 und 2 ein Abbau der Essigsäure mit zeitgleichem Anstieg der Temperatur. Beide Silagen zeigen nur geringe Gehalte an 1,2-Propandiol. Ein Anstieg des Propionsäuregehaltes konnte in der behandelten Silage SV 1 ermittelt werden. Die behandelte Silagen SV 3,4 & 5 zeigten die höchste aerobe Stabilität aller untersuchten Silagen. Alle Silagen zeichnen sich durch einen hohen Essigsäure- und 1,2 Propandiolanteil aus (Tabelle 28).

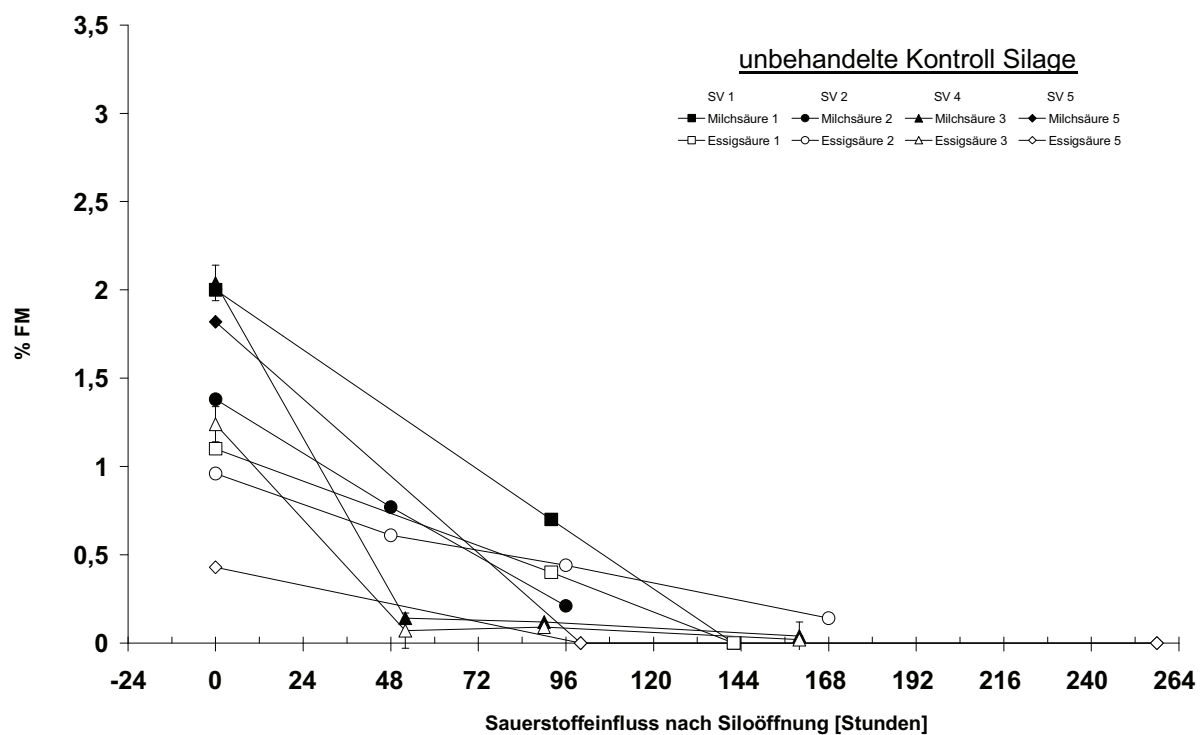


Abbildung 27: Verlauf der Hauptsäuren Milchsäure und Essigsäure unter Luftsauerstoff-Einfluss bei unbehandelter Silagen

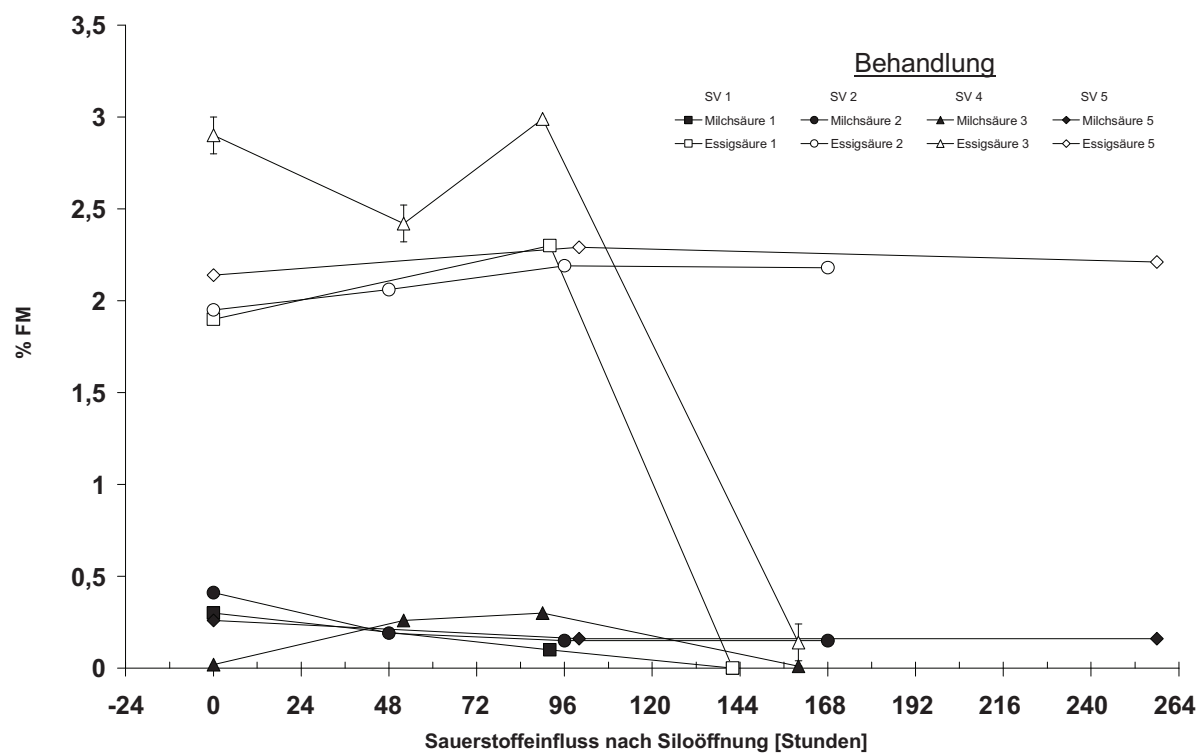


Abbildung 28: Verlauf der Hauptsäuren Milchsäure und Essigsäure unter Luftsauerstoff-Einfluss bei Behandlung der Silagen mit einem heterofermentativen Siliermittel

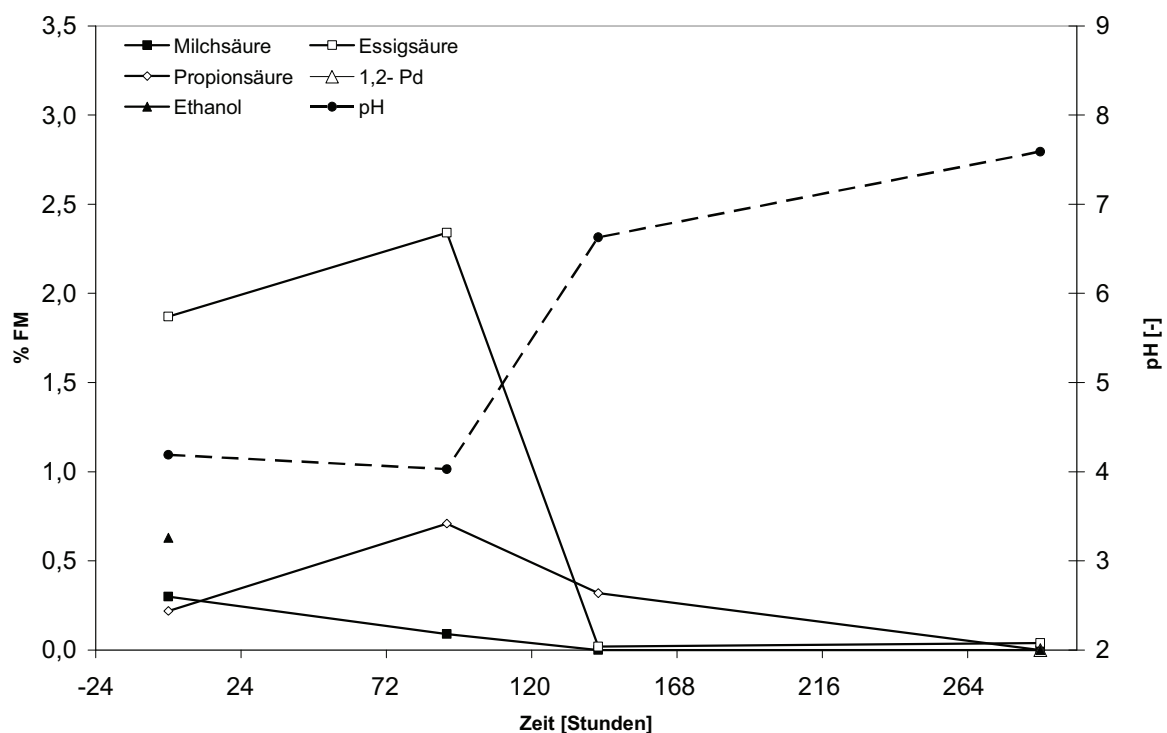


Abbildung 29: Gär säureverlauf behandelte Silage Silierversuch 1 unter Luftexposition

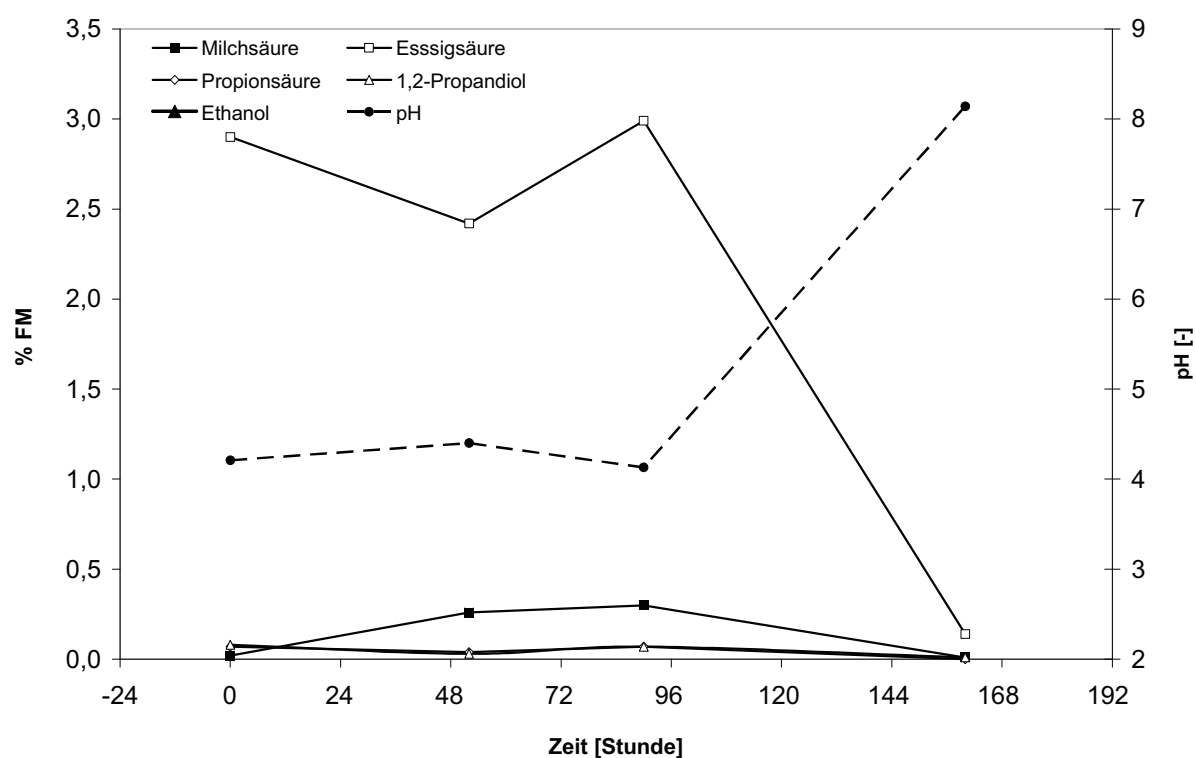


Abbildung 30: Gär säureverlauf behandelte Silage Silierversuch 2 unter Luftexposition

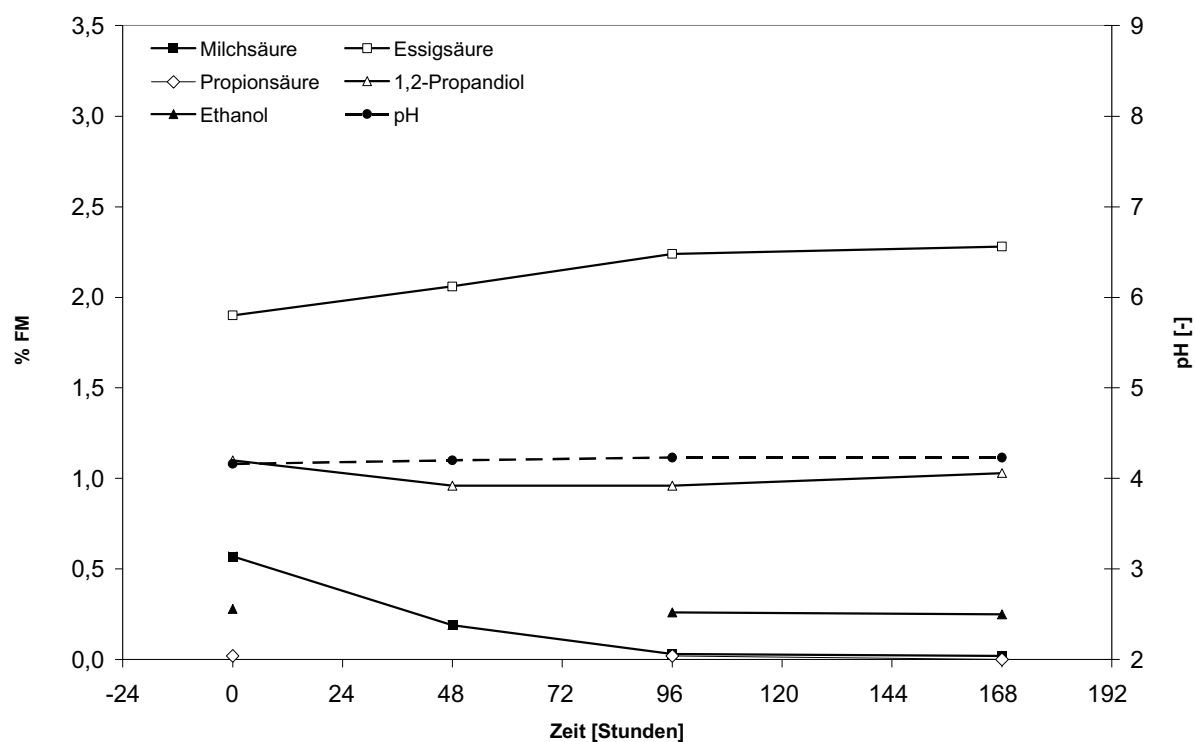


Abbildung 31: Gär säureverlauf der behandelten Silage Silierversuch 4 unter Luftexposition

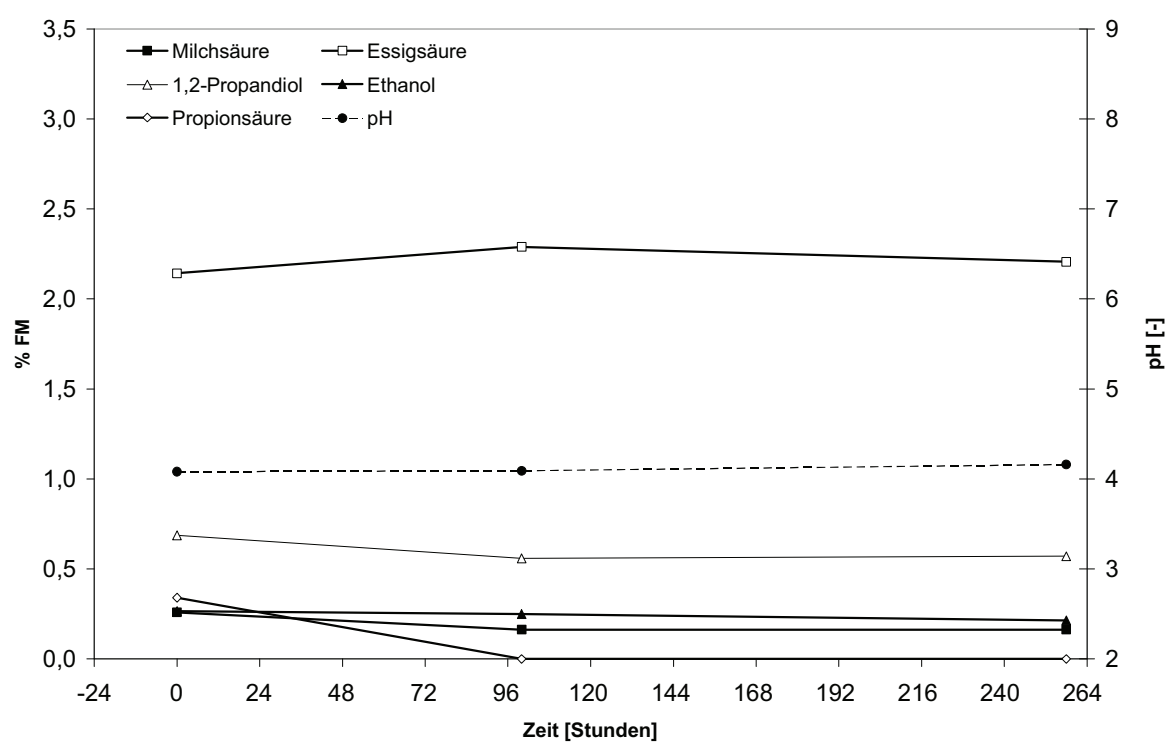


Abbildung 32: Gär säureverlauf der behandelten Silage Silierversuch 5 unter Luftexposition

4.2.2.2 Stoffliche Veränderungen

Zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc wurden die Silagen auf ihre Roh Nährstoffzusammensetzung untersucht. Deutliches Zeichen für die mikrobielle Aktivität ist der Anstieg des mikrobiell nicht abbaubaren Ascheanteils. Die Gehalte der einzelnen Faserfraktionen steigen ebenfalls an. Unter Berücksichtigung des Trockenmasseabbaus unterliegen diese aber ebenfalls einem mikrobiellen Abbau.

Formel 14 Berechnung des Roh Nährstoffabbaus zu den Zeitpunkten IIIb, c

$$[\%] = \frac{\text{Roh Nährstoff}_{\text{IIIb,c}} [\%] \cdot (\text{TM}_{\text{IIIb,c}} [\%]) \cdot 100}{\text{Roh Nährstoff}_{\text{II}} [\%] \cdot \text{TM}_{\text{II}} [\%]}$$

Tabelle 33 Silierversuch 1-Kontrolle: Veränderungen der Roh Nährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerobem Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb (142 Std.)	IIIc (288 Std.)
TM	25,6	100	94,9	79,3
Rohasche	3,1	100		
Rohfaser	25,5	100	95,6	96,4
ADF	28,5	100	94,9	87,4
NDF	51,5	100	82,5	78

Tabelle 34 Silierversuch 2-Kontrolle: Veränderungen der Roh Nährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerobem Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb (90 Std.)	IIIc (160 Std.)
TM	35,3	100	91,5	81,0
Rohasche	3,6	100		
Rohfaser	19,8	100	103	90,5
ADF	20,7	100	n.b.	94,7
NDF	40,3	100	n.b.	87,3

Tabelle 35 Silierversuch 3-Kontrolle: Veränderungen der Roh Nährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerobem Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb	IIIc (278 Std.)
TM	31,2	100	k.E.	93,5
Rohasche	3,5	100	k.E.	117
Rohfaser	21,5	100	k.E.	93,7
ADF	24,6	100	k.E.	98,7
NDF	45,3	100	k.E.	99,9

k.E. = keine Entnahme

Tabelle 36 Silierversuch 4-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerober Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb (96 Std.)	IIIc (168 Std.)
TM	27,5	100	92,7	78,9
Rohasche	4,41	100		
Rohfaser	18,33	100	99,8	102,7
ADF	21,3	100	101,4	103,5
NDF	41,7	100	104,5	92,5

Tabelle 37 Sorghum I-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerober Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb	IIIc (142 Std.)
TM	20,1	100	k.E.	82,6
Rohasche	6,8	100	k.E.	103,2
Rohfaser	38,2	100	k.E.	96,9
ADF	43	100	k.E.	88,7
NDF	67,4	100	k.E.	85,7

Tabelle 38 Sorghum II-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss

Parameter	Gehalt vor aerober Exposition	Gehaltsänderung [%] zum jeweiligen Zeitpunkt		
		II	IIIb	IIIc (278 Std.)
TM	23,2	100	k.E.	83,6
Rohasche	5,8	100	k.E.	103,8
Rohfaser	36,8	100	k.E.	90,2
ADF	39,7	100	k.E.	96,7
NDF	63,8	100	k.E.	99,9

4.2.3 Gewichtsbilanz

Die aerobe Mineralisation führt zu gasförmigen Verlusten in Form von CO₂. Die Bestimmung der Verluste kann aus der Gewichts Differenz vor und nach Luftexposition in Form von Frischmasseverlusten bestimmt werden oder über die Messung der Temperatur und der Umrechnung in Trockenmasseverluste über die Respirationsformel. Für die hier durchgeführten Versuche werden beide Berechnungswege in den Tabelle 62 – Tabelle 69 gegenübergestellt. Der Berechnungsweg über die Frischmasse-Gewichtsdifferenz erfolgt mit der Annahme der Konstanz der Feuchtemenge.

Die Berechnung der benötigten Frischmassemenge zum Bilanzzeitpunkt II (vor aerober Lagerung) für eine Batch-Einwaage von 300g zum Bilanzzeitpunkt IIIb und IIIc (nach Luftsauerstoff-Exposition) erfolgt nach Formel 15.

Formel 15 Berechnung der Ausgangsmenge Silage unter Berücksichtigung der Verluste durch aerobe Lagerung

$$\text{Silagemenge vor aerober Lagerung} = \frac{\text{Batch - Einwaage} \cdot 100\%}{(100\% - \text{Frischmasseverluste } \%)}$$

4.2.4 Bilanz-Ergebnisse

Die im Batch-Versuch ermittelten Gaserträge wurden auf die in Tabelle 39 berechneten Frischmassen vor Silierung bezogen. Die Trockenmasse-Verluste sind nach HONIG berechnet. Die Methanverluste wurden nach Formel 16 berechnet.

Formel 16 Berechnung des Methanverlustes in Prozent

$$\% - \text{CH}_4 - \text{Verlust}_{\text{IIIb,c}} = 100\% - \frac{\text{CH}_4 - \text{Ertrag}_{\text{IIIb,c}} \cdot 100\%}{\text{CH}_4 - \text{Ertrag}_{\text{II}}}$$

Tabelle 39 Berechnung der Frischmassemengen vor aerober Lagerung für eine Batch-Einwaage von 300g

Bilanz-Zeitpunkte		Erntematerial [g]	Siliverluste % FM	FM vor aerober Lagerung [g]	FM-Verluste durch aerobe Lagerung [%]	Batch- Einwaage [g]
Siliv Versuch 1						
Kon.	II	303,6	1,2	300,0	-	300,0
	IIIb	312,7	1,2	308,9	2,9	300,0
	IIIc	327,8	1,2	323,9	7,4	300,0
Beh.	II	305,8	1,9	300,0		300,0
	IIIb	313,7	1,9	307,7	2,5	300,0
	IIIc	321,2	1,9	315,1	4,8	300,0
Siliv Versuch 2						
Kon.	II	303,9	1,3	300,0	-	300,0
	IIIb	315,6	1,3	311,5	3,7	300,0
	IIIc	323,7	1,3	319,5	6,1	300,0
Beh.	II	303,9	1,3	300,0	-	300,0
	IIIb	307,6	1,3	303,6	1,2	300,0
	IIIc	315,6	1,3	311,5	3,7	300,0
Siliv Versuch 3						
Kon.	II	302,4	0,8	300,0	-	300,0
	IIIb	317,0	0,8	314,5	4,6	300,
Beh.	II	305,2	1,7	300,0	-	300,0
	IIIb	310,2	1,7	304,9	1,6	300,0
Siliv Versuch 4						
Kon.	II	303,3	1,1	300,0	-	300,0
	IIIb	308,9	1,1	305,5	1,8	300,0
	IIIc	323,1	1,1	319,5	6,1	300,0
Beh.	II	304,3	1,4	300,0	-	300,0
	IIIb	305,9	1,4	301,7	0,6	300,0
	IIIc	308,7	1,4	304,4	1,4	300,0
Siliv Versuch 5						
Kon.	II	303,2	1,1	300,0	-	300,0
	IIIb	313,5	1,1	310,2	3,3	300,0
	IIIc	330,4	1,1	326,9	8,2	300,0
Beh.	II	304,0	1,3	300,0	-	300,0
	IIIb	305,4	1,3	301,4	0,5	300,0
	IIIc	308,0	1,3	303,9	1,3	300,0

Tabelle 40 Gegenüberstellung der Methanausbeuten, Trockenmasseverlusten nach HONIG und den Methanverlusten

Bilanzzeitpunkt	II Methanausbeute m ³ / t TM _k	IIIb Methanausbeute m ³ / t TM _k	Verluste %- TM	Verluste %-CH ₄	IIIc Methanausbeute m ³ / t TM _k	Verluste %- TM	Verluste %-CH ₄
Silierversuch 1							
Kon. ¹⁾	319 ^a	279 ^b	11,9	12,3	185 ^c	26	42
Beh. ¹⁾	313 ^a	289 ^a	12,8	7,8	203 ^b	20,3	35,2
Silierversuch 2							
Kon. ¹⁾	335 ^a	311 ^a	6,1	7	272 ^b	13,3	19
Beh. ¹⁾	334	329	0,2	2	341	3,4	-2,0
Silierversuch 3							
Kon. ¹⁾	320 ^a	-	-	-	284 ^b	6,1	11,3
Beh. ¹⁾	344	-	-	-	291	0	15,4
Silierversuch 4							
Kon. ¹⁾	301 ^a	273 ^b	6,8	9,1	214 ^c	23,3	28,6
Beh. ¹⁾	304	300	2,8	1,4	294	5,8	3,2
Silierversuch 5							
Kon. ¹⁾	304 ^a	256 ^b	13,7	15,9	178 ^c	37,9	41,5
Beh. ¹⁾	319 ^a	300 ^b	0	6,1	299 ^b	0,2	6,3
Sorghum 1							
Kon. ¹⁾	264 ^a	-	-	-	208 ^b	19	21,2
Beh. ¹⁾	286	-	-	-	282	0	1,4
Sorghum 2							
Kon. ¹⁾	314 ^a	-	-	-	219 ^b	20	30,2
Beh. ¹⁾	338	-	-	-	333	0	1,5
Praxisanlagen 2							
1	357 ^a	-	-	-	341 ^b	3,3	4,5
2	342 ^a	-	-	-	287 ^b	12,7	16,1
3	332	-	-	-	326	0,4	1,9
4	333 ^a	-	-	-	321 ^b	4,0	3,6
5	321 ^a	-	-	-	255 ^b	15,6	20,6

¹⁾Unterschiedliche Hochbuchstaben zeigen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von p < 0,05 statistisch abgesicherte Unterschiede im Methanertrag zwischen den unterschiedlichen Bilanzzeitpunkten innerhalb einer Behandlung

4.2.5 Ermittlung der Methanverluste pro Stunde Erwärmung

Der Zeitraum der aufgrund von mikrobiellen Stoffwechselaktivitäten zum Energieverlust führt wird aus der Differenz der Dauer der aeroben Exposition des jeweiligen Bilanzzeitpunktes und dem Zeitraum aeroben Stabilität der Silage gebildet (Spalte 2, Tabelle 41). Werden die entstandenen Methanverluste der einzelnen Bilanzzeitpunkte auf den jeweiligen Erwärmungszeitraum bezogen ergibt sich der Methanverlust je Stunde Erwärmung. Im Mittel ergeben sich ca. 0,15 % Methanverluste je Stunde Erwärmung, ohne Unterschiede zwischen Mais und Sorghum.

Tabelle 41 Berechnung der Methanverluste aus Dauer der aeroben Exposition

		Zeitraum Erwärmung [h]	CH ₄ -Verluste [%]	CH ₄ -Verlust • h ⁻¹ [%]
SV 1				
Kon. ¹⁾	IIIb	80	12,3	0,15
	IIIc	226	42	0,19
SV 2				
Kon. ¹⁾	IIIb	68	7	0,10
	IIIc	138	19	0,14
SV 3				
Kon. ¹⁾	IIIb	134	11,3	0,08
SV 4				
Kon. ¹⁾	IIIb	67	9,1	0,14
	IIIc	169	28,6	0,17
SV 5				
Kon. ¹⁾	IIIb	83	15,9	0,19
	IIIc	241	41,5	0,17
Mais, Durchschnitt				
				0,15 ± 0,04
Sorghum 1				
Kon. ¹⁾	IIIc	206	21,2	0,10
Sorghum 2				
Kon. ¹⁾	IIIc	170	30,2	0,18
Sorghum , Durchschnitt				
				0,14 ± 0,05

4.3 Wirkung verschiedener Kohlenstoffquellen in der Biogasgestehung

Batch-Versuch:

Die Zugabe von jeweils 20 g. der beiden Kohlenstoffquellen Milchsäure und Essigsäure führen zu unterschiedlichen Gär säuremustern im Biogasprozess (Abbildung 33, Abbildung 34). Deutliche Unterschiede zeigen sich ebenfalls in der Biogasproduktion.

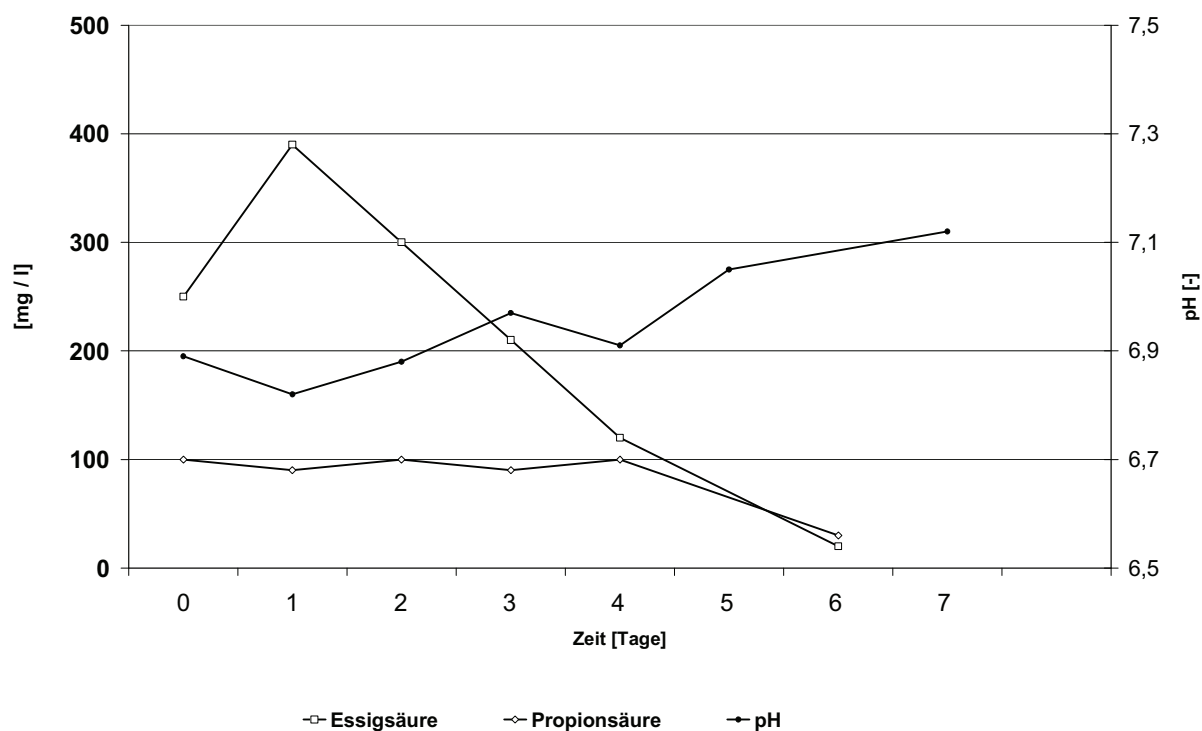


Abbildung 33 Säureverlauf bei Zugabe von Essigsäure

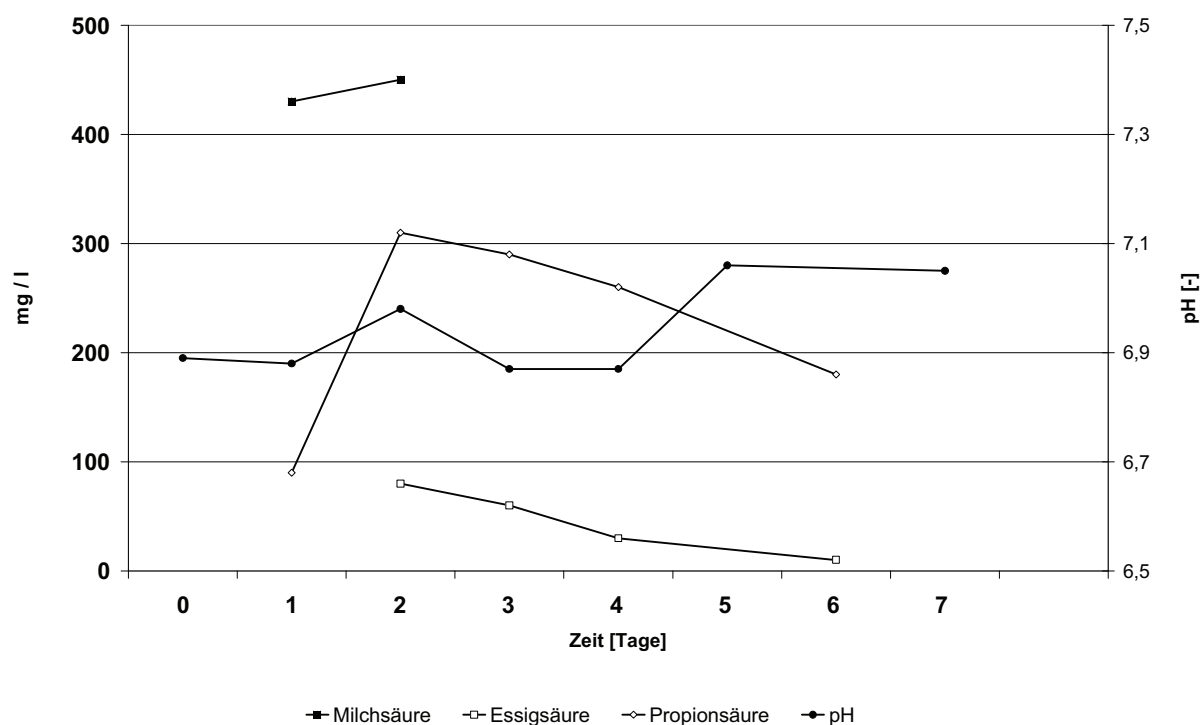


Abbildung 34 Säureverlauf bei Zugabe von Milchsäure

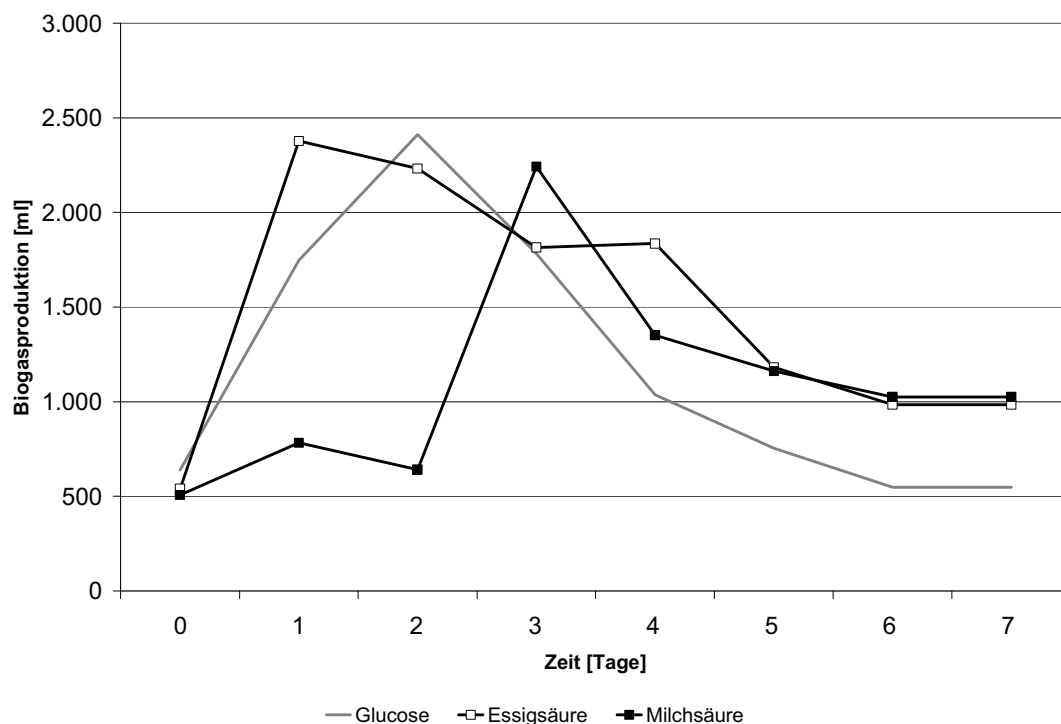


Abbildung 35: Biogasproduktion bei Batch-Vergärung von Glucose, Essigsäure und Milchsäure

Fed-Batch I:

Über einen Zeitraum von 10 Tagen wurden jeweils 10 g. Glucose, Milchsäure und Essigsäure semikontinuierlich vergärt. Nach 17 Tagen wurde die entstandene Gasmenge mit den theoretischen Gasmengen nach Buswell verglichen.

Tabelle 42: Abbaugrade bei semikontinuierlicher Zugabe

	Glucose	Milchsäure	Essigsäure	Propionsäure
Abbaugrad [%]	79,3 ± 2,3	62 ± 2,6	86,5 ± 1,4	86,0 ± 1,8

Die Abbaugrade von Essigsäure und Propionsäure liegen auf einem vergleichbaren Niveau von ca. 85%. Glucose erreicht eine Abbaugrade von im Mittel 80% bei einer hohen Streuung. Der Abbaugrad von Milchsäure erreicht nur knapp über 60%.

Fed-Batch II:

Die Gär säureverteilung bei Zugabe der verschiedenen Kohlenstoffquellen zeigt deutliche Unterschiede. Bei Zugabe von Milchsäure stellt sich ein mittleres Gär säuremuster mit einem Propionsäureanteil von 30% der Gesamtsäurebelastung ein. Bei der Vergärung von Essigsäure werden keine Intermediaten gebildet. Die Vergärung von Propionsäure führt zu schwankenden Essigsäuregehalten.

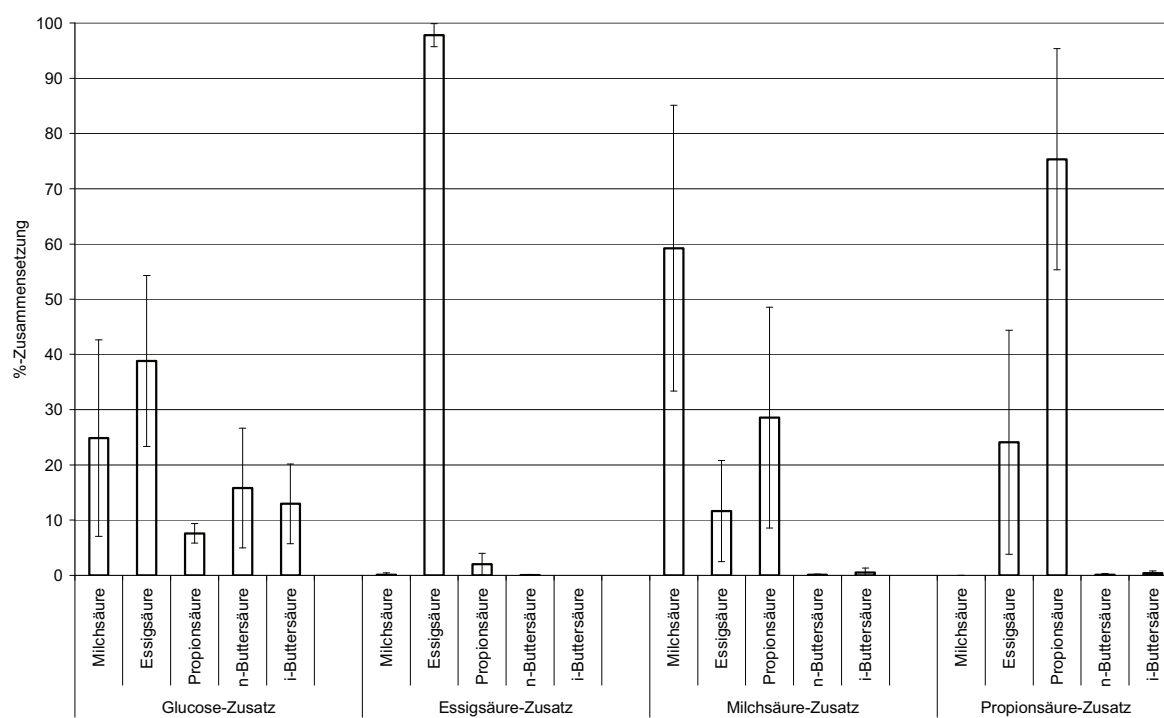


Abbildung 36: Mittlere Zusammensetzung der Säureverteilung im Fed-Batch-Ansatz über 14 Tage mit verschiedenen Kohlenstoffquellen

5 Diskussion

5.1 Versuchskonzept

Die verlustarme Substratbereitstellung für die Biogasproduktion hat einen erheblichen Anteil am wirtschaftlichen Erfolg von landwirtschaftlich betriebenen Biogasanlagen. Im Kontrast hierzu erfolgt die Beurteilung von Substraten zur Biogaserzeugung im Wesentlichen anhand der Biogasausbeute nach der Silierung. Konservierungseigenschaften und Einfluss der Silierung auf die Biogasausbeute werden nur in wenigen Untersuchungen bearbeitet, oftmals ohne Berücksichtigung der gesamten Verfahrenskette und den damit verbundenen Verlusten. Hier schließt die vorliegende Arbeit, mit dem Schwerpunkt den Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute über die gesamte Prozesskette der Substratbereitstellung zu untersuchen, an. Die Prozesskette der Substratbereitstellung wurde, für die hier vorliegenden Bilanzierungsversuche, wie folgt festgelegt:

Ernte – Silierung – Auslagerung – Gasertrag

Für die Bilanzierung wurden die Verlustgrößen: Gärgasverluste und Nacherwärmungsverluste berücksichtigt. Bilanzgröße ist die Methanausbeute pro Kilogramm Trockenmasse, wobei die Trockenmasse um die leicht flüchtigen Bestandteile nach WEISSBACH (2005) korrigiert wurde. Weitergehende Verluste wie z.B. Restatmungsverluste und Sickersaftverluste die in der Praxis auftreten wurden in diesem Rahmen nicht bearbeitet. In der Praxis führen diese Verlustgrößen aber zu weiter abnehmenden Energieausbeuten je Hektar.

Weiterhin wurde der Einfluss einer heterofermentativen Silierung auf die Biogaserzeugung, unter praxisnaher Berücksichtigung der Verlustgrößen, untersucht. Hierfür wurde bei allen Bilanzversuchen eine weitere Behandlung mit einem Kombinationsprodukt aus homo- und heterofermentativen MSB eingesetzt.

Der Einfluss der aeroben Lagerung wurde im standardisierten HONIG-Test untersucht. Das an der FAL in Völkenrode entwickelte Verfahren ermöglicht es, anhand der Temperaturentwicklung bei aerober Lagerung, die entstehenden Trockenmasseverluste zu berechnen HONIG (1999). Um den zeitlich abhängigen Einfluss des Luftsauerstoffs auf die stofflichen Zusammensetzungen der Silage und die Methanausbeute zu ermitteln, wurde zu unterschiedlichen Bilanzzeitpunkten Silage aus dem HONIG-Test entnommen und analysiert. Die Entnahmezeitpunkte wurden in Abhängigkeit der Wärmeentwicklung der unbehandelten Kontrollsilagen festgelegt und sind damit von der aeroben Stabilität der Silage abhängig und innerhalb der Bilanzversuche unterschiedlich. Der Umfang der Analysen umfasste für die erste Entnahme aus dem aeroben Stabilitätstest, den Trockenmassegehalt sowie das Gär säuremuster. Es wurde davon ausgegangen, dass es in den ersten Stunden des Lufteinflusses weniger zu einer Veränderung der Pflanzenfraktion als vielmehr zu einer Veränderung des Gär säuremusters kommt. Die weiteren Analysen nach aerober Lagerung erfolgten auf Gär säuremuster sowie auf die einzelnen Pflanzenfraktionen.

Die Ermittlung des Methanertrages erfolgte in 4-fach-Ansätzen im GRW-Batch-Test, der aufgrund seines Fermentervolumens eine Probeneinwaage von 300 g. oder mehr erlaubt. Das zu untersuchende Substrat bedarf hierdurch keiner weitergehenden Aufbereitungsschritte, die eine potentielle Beeinflussung des Ergebnisses verursachen können.

5.2 Beurteilung des Ausgangsmaterials

Das Erntematerial der Bilanzversuche wurde im Rahmen der Ernten der Jahre 2007 und 2008 von fünf Praxisbetrieben bezogen, die in räumlicher Nähe der Silierung lagen. Die Silierung erfolgte in allen Fällen weniger als 4 Stunden nach Bereitstellung des Erntematerials. Die Trockenmassegehalte (25,7 – 35,3%) decken ein weites Spektrum ab, wobei mit einem Trockenmassegehalt von unter 30% in der Praxis unter Umständen schon mit Sickersaftanfall gerechnet werden muss (THAYSEN, 2007). Die Gehalte der verschiedenen Pflanzenfraktionen schwanken in geringen Breiten und lagen für Stärke im unteren Bereich, Rohfasergehalte schwankten zwischen 19,7% und 25% und lagen damit im oberen Bereich der üblichen Zielgröße.

Häcksellänge und Aufbereitungsgrad der einzelnen Erntematerialien wurden nicht erfasst, können aber als praxisüblich charakterisiert werden, da alle Materialien von Praxisbetrieben mit der derzeit üblichen Erntetechniken eingebracht wurden. Der Aufbereitungsgrad des Pflanzenmaterials hat indess einen vielfältigen Einfluss auf die nachfolgenden Prozessschritte und Verfahrenskette. Mit steigendem Aufbereitungsgrad erhöht sich die nachweisbare MSB_{gesamt} Keimdichte im Erntematerial (PAHLOW & MÜLLER, 1995). Einen Einfluss unterschiedlicher Häcksellängen auf die Gärqualität konnte hingegen von LEURS (2005) nicht ermittelt werden.

Der epiphytische Besatz wurde durch Auszählung bestimmt. Alle vier Materialien lagen mit einer MSB_{gesamt} Keimdichte zwischen $1,8E+05$ und $9,6E+05$ im unteren Bereich. Der Besatz an **Schimmelpilzen** lag bei vier Erntematerialien im Bereich von $2,1E+02$ – $7,0E+04$, das Material SV2 lag mit $1,7E+06$ deutlich darüber. Die ermittelten **Hefenkonzentrationen** schwankten zwischen $7,3E+04$ bis $2,2E+06$ $KbE \bullet g^{-1}$ FM, wobei zwei Silagen Hefenkonzentrationen von $1,6E+06$ und $2,2E+06$ $KbE \bullet g^{-1}$ FM aufwiesen und damit über der nach KALZENDORF (2007) kritischen Grenze von $1,0E+06$ $KbE \bullet g^{-1}$ FM für Silagen liegen, nach der mit Nacherwärmungsproblem zu rechnen ist. Silage SV 2 zeigte bei Hefen eine erhöhte und bei Schimmel die höchste Konzentration was auf die verstärkte Abreife des Materials mit einem Trockenmassegehalt von 35% zurückgeführt werden kann.

5.3 Silierung und Silierverluste

Die Silierung erfolgte für die Silagen SV 1, 2, 4 und 5 in 5-Liter-Eimern. Die Silierung des Materials Silierversuch 3 erfolgte in Weckgläsern. Die Lagerdauer betrug bei allen Silagen 90 Tage bei 21 °C Raumtemperatur.

Der Stoffwechselweg heterofermentativer MSB bildet als ein Endprodukt CO_2 . Gegenüber einer rein homofermentativen Silierung ist hierdurch mit leicht höheren Gewichtsverlusten zu rechnen. Im

Gegenzug beträgt der Bruttoenergieverlust durch die heterofermentativen Fermentationswege weniger als 2% (ROOKE & HATFIELD, 2003) (PAHLOW, 2004). Bei zwei von fünf Silierversuchen konnte kein signifikanter Anstieg der **Gärgasverluste** bei Einsatz des heterofermentativen Siliermittels festgestellt werden. Die mittlere abs. Erhöhung der Trockenmasseverluste durch heterofermentative Silierung liegt mit $1,2 \pm 0,9$ % TM unterhalb der von Pahlow angegebenen 3 – 5% TM PAHLOW (2004), deckt sich aber mit Daten einer Meta-Analyse von KLEINSCHMIT (2006). Bei Auswertungen von 43 Silierexperimenten resultierte hier aus dem Einsatz eines heterofermentativen Siliermittels im Mittel eine Erhöhung der TM-Verluste von 1,5 %.

Unterschiede in den Verlusthöhen in Abhängigkeit der Silierdauer werden von NISHINO (2002) mit Maisganzpflanzen-Silage ermittelt. Es zeigte sich hierbei am Öffnungstag 60 mit einer Differenz von 5,1 % TM signifikant höhere Trockenmasseverluste bei einer *L. buchneri* Behandlung die am Öffnungstag 120 auf einen nicht signifikanten Unterschied von 2,47 % TM absanken.

Gärgasverluste in Abhängigkeit des Trockenmassegehaltes wurden bei Untersuchungen der sächsischen Landesanstalt mittels Bilanzbeutemethode gefunden (STEINHOEFEL, 2004). Für die hier erhobenen Silierverluste der unbehandelten Silagen kann ein solcher Zusammenhang ebenfalls hergestellt werden. Eine gesteigerte Konkurrenzfähigkeit von *L. buchneri* gegenüber den epiphytischen LAB und den co-inoculierten homofermentativen LAB bei geringen Trockenmassegehalten, wie sie von DRIEHUS (2001) bei Grassilagen angenommen werden, zeigen sich ebenfalls. DRIEHUS gibt die zusätzlichen Trockenmasseverluste mit einer Spannweite von 0,7 bis 3,8 % TM an, wobei die höchsten Verlustdifferenzen bei dem geringeren Trockenmassegehalt (23,7 %) auftraten gegenüber einer Silage mit 32,8 % TM. Ähnliche Tendenzen werden von KLEINSCHMIT (2006) bei Gras- und Getreidesilierung gefunden. Bei einer Meta-Auswertung von verschiedenen Silierversuchen konnte der Autor eine schwache positive Korrelation ($R^2=0,29$, $P < 0,01$) zwischen Trockenmassegehalt und dem Milchsäure-Essigsäure-Verhältnis ermitteln.

Die Gärsäuremuster der Kontrollsilagen charakterisieren den im Normalfall stark homofermentativen Besatz von Maispflanzen, wie er von verschiedenen Autoren berichtet wird (RUSER, 1989) (LIN et al., 1992). Die bei Silierversuch 1 nicht signifikante Differenzen im Gärgasverlust ist auf einen Essigsäuregehalt von 3,9% TM_k der unbehandelten Kontrollsilage zurückzuführen, der aus einem relativ starken epiphytischen Besatz an heterofermentativen MSB resultieren kann. Gleichwohl führte die Behandlung mit dem heterofermentativen Siliermittel zu einer weiteren Erhöhung des Essigsäuregehaltes. Die ermittelten Gärverluste liegen in der nach Literaturrecherche für unbehandelte Maissilagen im üblichen Rahmen, die heterofermentativ behandelten Silagen zeigen leicht niedrigere Verluste als nach Literaturrecherche zu erwarten gewesen wäre.

5.4 Effekte des MSB_{hohe} -Siliermittels auf die Gärqualität, aerobe Stabilität und stoffliche Veränderungen unter aerober Lagerung

5.4.1 Effekte auf die Gärqualität

Das untersuchte Erntematerial Mais weist nach JEROCH (1999) einen hohen Vergärbarkeitskoeffizienten auf. Gemäß WEISSBACH & HONIG (1996) kann bei einem Vergärbarkeitskoeffizienten von >45 eine stabile Gärung erwartet werden. Auf eine Überprüfung des Gärverlaufes wurde bis auf SV 4 & 5 aus diesem Grunde verzichtet. Die Überprüfung des Siliererfolges wurde für alle Silagen am Tag 90 der Silierung durchgeführt.

Der Einsatz des heterofermentativen Siliermittels hat einen deutlichen Einfluss auf den Hefenbesatz. Bis auf SV 1 liegt bei allen behandelten Silagen der Hefebesatz nach 90 Tagen Silierdauer unterhalb der Nachweisgrenze. Die Entwicklung der **Hefenpopulation** in Abhängigkeit des Siliermitteleinsatzes zeigt Silierversuch 4 & 5. Mit steigendem Essigsäuregehalt wird der Ausgangsbesatz an Hefen bis zum Siliertag 90 unterhalb der Nachweisgrenze gesenkt. Vergleichbare Ergebnisse werden ebenfalls von anderen Autoren beschrieben (Driehus, 1999). TABACCO (2009) konnte bei Mais und Sorghum eine signifikante Reduzierung des Hefenbesatzes um $1,0E+06$ bei Mais und Sorghum durch eine *L. buchneri* Behandlung nachweisen. Die unbehandelten Kontrollsilagen sowie die *L. plantarum* behandelten Silagen zeigten nur eine Reduzierung des Hefenbesatzes von $1,0E+02$. Da Hefen als Auslöser des aeroben Verderbes gelten (McDONALD, 1991), ist eine Depression der Hefenpopulation durch die Siliermittelbehandlung als positiv zu bewerten. Eine Reduzierung des Hefenbesatzes bei steigender Dosierung von *L. buchneri* ermittelt KLEINSCHMIT (2006) im Rahmen einer Meta-Analyse. Eine Dosierung von weniger als $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ reduzierte den Hefenbesatz um den Faktor 10 gegenüber der Kontrolle und eine Dosierung von mehr als $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ um den Faktor 100. Nach MUCK (1992) hat der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre Einfluss auf die Entwicklung des Hefebesatzes. Hohe CO_2 -Gehalte wie sie sich in Laborsilos einstellen unterdrücken die Entwicklung von Hefen. Bezogen auf die vorliegenden Ergebnisse bedeutet dies, dass in Praxis mit einer stärkeren Vermehrung der Hefen gerechnet werden muss.

Ein über den Silierzeitraum variabler Besatz an epiphytischen MSB wird von verschiedenen Autoren beschrieben (LIN, 1992) (PAHLOW, 2005). Zu Beginn der Silierung kommt es zu einer massiven Vermehrung der MSB die auf eine gute Verfügbarkeit von Kohlenhydraten zurückzuführen ist. Mit fortschreitender Silierdauer kommt es wieder zu einer Reduktion des MSB-Besatzes. Ziel der Beimpfung des Erntegutes mit einem MSB-Inoculum ist die Modifikation des Gärsäuremusters durch eine Dominierung des epiphytischen Besatzes. Der **Besatz mit MSB_{gesamt}** am Tag 90 liegt bei allen behandelten Silagen über den entsprechenden unbehandelten Kontrollsilagen. Untersuchungen von TABACCO (2009) zeigen ebenfalls eine signifikante Erhöhung der MSB-Konzentration nach 90 Tagen Silierdauer bei Einsatz eines Siliermittels mit *L. buchneri* gegenüber der unbehandelten Kontrolle und einer homofermentativ (*L. plantarum*) behandelten Variante. Der Effekt konnte in Mais und Sorghum-Silagen beobachtet werden. Bei *L. buchneri* Behandlung von Mais-GPS werden von NISHINO (2002) am Öffnungstag 60 und 120 MSB-Zahlen $>1,0E+08 \text{ KbE}$ ermittelt während die unbehandelte Silage

sinkenden MSB-Zahlen aufweist. Eine höhere Anzahl an MSB gegenüber einer unbehandelten Kontrollsilage wurde bei der Silierung von gequetschten Weizenkörnern beobachtet (ADESOGAN, 2003). Die Zugabe von *L. buchneri*, *L. fermentum* und *Leuconostoc mesenteroides* zeigten hier jeweils höhere MSB-Zahlen als die unbehandelte Kontrolle.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine Differenzierung der MSB nicht vorgenommen werden. Untersuchungen von (SCHMIDT et al., 2009) zeigen aber, dass der MSB-Besatz von *L. buchneri* behandelten Silagen zum Ende der Silierung von *L. buchneri* dominiert wird. Gleiches ermittelt SCHMIDT (2010) bei Maissilagen mit reiner *L. buchneri* Behandlung sowie einer kombinierten Behandlung mit *L. buchneri* und *Pediococcus pentosaceus*. Bei beiden Behandlungen lag die mittlere Anzahl *L. buchneri* über 5 Versuche bei $5,0E+06$ im Vergleich zu $7,4E+04$ bei den unbehandelten Kontrollen. Die ermittelten höheren MSB-Zahlen und die höheren Essigsäuregehalte lassen eine Domierung des epiphytischen Besatzes durch die zugegebenen MSB-Stämme als wahrscheinlich erscheinen.

5.4.2 Verlauf der Gärsäurebildung

Die Essigsäurebildung durch *L. buchneri* erfolgt nach OUDE-ELFERING (2001) aus einem Umbau von Milchsäure. Die Bildung von Essigsäure erfolgt dabei im späteren Verlauf der Silierung (DRIEHUS et al. 1999) (OUDE-ELFERING, 1999). Dies gilt auch bei den hier untersuchten Silagen, SV 4 und SV 5. Von Tag 14 bis zu Tag 90 erfolgt eine Verdoppelung des Essigsäuregehaltes bei Einsatz des heterofermentativen Siliermittels. Die Essigsäuregehalte der unbehandelten Kontrollsilagen stagnieren auf dem Niveau des am Tag 14 ermittelten Gehaltes von ca. 2 % TM. Untersuchungen von SCHMIDT (2009) zeigen ebenfalls einen stagnierenden Essigsäuregehalt von Tag 45 bis 90 von 2 % TM und einen über den gesamten Silierzeitraum steigenden Essigsäuregehalt in der *L. buchneri* behandelten Silage.

Der Einfluss des Siliermittels hat in allen Fällen deutlichen Einfluss auf das Gärsäuremuster am Tag 90. Die Gehalte an Milch- und Essigsäure in den unbehandelten Kontrollsilagen zeigen eine deutlich homofermentative Ausprägung. Das **MS:ES-Verhältnis** der Kontrollsilagen lag zwischen 1,6 und 3,8. KUNG & STOKES (2002) sowie WILHELM (1993) sprechen ab einem Verhältnis von 3:1, ZIMMER (1993) zwischen 4-5:1 von einer dominant homofermentativen Silierung. Die behandelten Silagen weisen im Durchschnitt ein MS:ES-Verhältnis von $0,2 \pm 0,1$ auf. Der pH-Wert der behandelten Silage lag in allen Versuchen um durchschnittlich $0,38 \pm 0,1$ pH-Wert Punkte über der Kontrolle. Die ermittelten **Essigsäuregehalte** von 5,2 – 8,6% TM_k würden bei Bewertung der Silage zur Tierernährung nach DLG-Schlüssel zu einer Abwertung der Gesamtpunktzahl führen. Der 1,2-Propandiolanteil als weiteres Stoffwechselprodukt der heterofermentativen MSB OUDE-ELFERINK (2001) lag nur in einem Fall der behandelten Silagen nicht über der Kontrolle. Im Mittel wurde ein **1,2-Propandiolgehalt** von 1,92 % TM_k gefunden. Wobei die gefundenen Werte stark schwankten ($0,2 - 3,9$ % TM_k). Erhebliche Gehalte an 1,2-Propandiol von annähernd 5 % TM werden von NISHINO (2002) ermittelt. Von anderen Autoren werden oftmals Gehalte von unter 2 % TM gefunden (SCHMIDT, 2009), (KANG, 2009). 1,2-Propandiol kann durch epiphytisch vorkommenden *L.*

diolivorans zu Propionsäure und Propanol umgesetzt werden (KROONEMAN et al., 2002). Propionsäure konnte am Tag 90 in keiner Silagen nachgewiesen werden.

1,2-Propandiol konnte in der Silierversuch 1 nicht nachgewiesen werden, hierfür lag aber der Ethanolanteil, ebenfalls Stoffwechselprodukt heterofermentativer MSB OUDE-ELFERINK (2001), mit 2,2% TM_k oberhalb der Kontrolle.

5.4.3 Effekte auf die aerobe Stabilität und Trockenmasseverluste

Der positive Einfluss der heterofermentativen Silierung auf die **aerobe Stabilität** wird in der Literatur vielfach beschrieben (MUCK, 1999), (FILYA, 2003), (KLEINSCHMIT, 2006). In den hier durchgeführten Versuchen verbesserte die Anwendung des heterofermentativen Siliermittels ebenfalls die aerobe Stabilität signifikant. In den Silierversuchen Silierversuch 3, 4 und 5 wurde im Untersuchungszeitraum (SV 3: 280 Std., SV 4: 198 Std., SV 5: 258 Std.) die aerobe Stabilität der behandelten Silage nicht gebrochen. Im SV 3 konnte der heterofermentative Siliermittelzusatz die geringe Stabilität der unbehandelten Kontrollsilage von 12 Stunden um den Faktor 16 erhöhen. Eine aerobe Stabilität von über 912 Stunden wurde bei einer *L. buchneri* Dosierung $1,0E+06 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ von RANJIT (2002) ermittelt. Eine mittlere aerobe Stabilität von 503 Stunden zeigten Silagen mit einer Impfdichte von mehr als $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$ (KLEINSCHMIDT, 2006).

Die unbehandelten Kontrollsilagen zeigten einen annähernd sofortigen Temperaturanstieg. Zwei Silagen erwärmten sich innerhalb der ersten 24 Stunden um $+3^\circ$ gegenüber Umgebungstemperatur, eine Silage war 2,5 Tage aerob stabil, Silierversuch 3 zeigte eine aerobe Stabilität von 5,5 Tagen. Diese Daten decken sich mit Erhebungen von anderen Autoren. Die unbehandelte Maisvariante zeigte bei RANJIT (2002) eine aerobe Stabilität von 26,5 Stunden und bei KLEINSCHMIT (2006) von 25 Stunden.

Einen linearen Zusammenhang zwischen steigendem Hefenbesatz und einer Verringerung der aeroben Stabilität wird durch KUNG (1989) hergestellt. Bei TABACCO (2009) kommt es ab einem Hefenbesatz von $1,0E+05$ zu einer Temperaturerwärmung. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Laborsilagen mit einem Hefenbesatz von mehr als $1,0E+05$ zeigten eine annähernd sofortige Erwärmung.

Während der aeroben Exposition kommt es zu einer Vermehrung des epiphytischen Hefenbesatzes der Silage (PAHLOW, 1985). Ein linearer Anstieg des Hefenbesatzes bei einem Besatz von ca. $3,0E+05$ bei Tag 0 der aeroben Exposition auf ca. $3,0E+08$ um den Faktor 1000 innerhalb von 2 Tagen aerober Exposition ergeben Versuche von RANJIT (2002).

Während der Luftsauerstoff-Exposition im HONIG-Test zeigten alle unbehandelten Kontrollsilagen nur eine geringe aerobe Stabilität und einen für den aeroben Verderb typischen **Temperaturverlauf**. Nach dem Bruch der aeroben Stabilität kommt es zu einem raschen Anstieg der Temperatur bis zu einem ersten lokalen Maximum zwischen $36 - 40^\circ\text{C}$. Im Weiteren erfolgt ein Abklingen der Temperatur auf $24 - 28^\circ\text{C}$ und im Anschluss ein wiederholter Anstieg der Temperatur auf ein zweites lokales Temperaturmaximum. Dieses liegt auf einem ähnlichen Temperaturniveau wie das erste Maximum. Vergleichbare Temperaturverläufe werden auch von anderen Autoren beschrieben. Bei MARTENS

(2006) tritt die aerobe Instabilität der Silage innerhalb von 42 Std. auf, das erste Temperaturmaximum mit 41°C nach 52 Std., das zweite Maximum nach 126 Std. mit 43 °C. Die zeitliche Differenz von 72 Std. zwischen den beiden Temperaturmaxima liegt unterhalb des hier ermittelten Differenzmittels von 106 ± 19 Std. ($n= 7$; unbehandelte Kontrollsilagen) für Maissilage und 92 ± 17 Std. für Sorghum. TABACCO (2009) findet in seinen Untersuchungen eine Differenz von 125 Std. Die erzielten Temperaturhöhen decken sich bei beiden Autoren mit den hier untersuchten Maissilagen.

Nur im Silierversuch SV 1 konnte auf Grund der nur leicht verbesserten aeroben Stabilität auch bei der Behandlung der typische Temperaturverlauf beobachtet werden, wobei die Temperaturmaxima geringer ausfielen und im Verlauf der Exposition zu späteren Zeitpunkten auftraten. Die Differenz zwischen beiden Temperaturmaxima betrug 170 Std. und liegt damit wesentlich über der für die Kontrollsilagen ermittelten 106 Stunden. Ähnliche Effekte wurden ebenfalls von ADESOGAN (2003) bei Silagen mit heterofermentativen Siliermitteln beobachtet. Ursächlich können die nachfolgend diskutierten Stoffwechselvorgänge während der Exposition durch die *L. buchneri* Behandlung sein.

Die Temperaturentwicklung der Sorghum-Silagen blieb unterhalb von 30°C. Dies kann auf den höheren Wassergehalt der Probe und der damit verbundenen veränderten Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt werden (HONIG, 1999). Korrespondierend hierzu findet TABACCO (2009) in Sorghum-Silagen mit einem Trockenmassegehalt von ca. 40 % eine maximale Temperaturerwärmung von 40°C über einen Versuchszeitraum von 14 Tagen. Die leicht höhere aerobe Stabilität (+41 Std.) der in dieser Arbeit untersuchten Sorghum-Silagen im Vergleich zum Mittel der unbehandelten Mais wird in der Literatur nicht bestätigt. TABACCO (2009) stellt bei unbehandelten Mais und Sorghum-Silagen eine zeitgleich einsetzende Temperaturerwärmung nach 40 Std. fest. Ursächlich kann der starke Besatz an Hefen im Ausgangsmaterial bei TABACCO (2009) sein, der mit $1,2E+07$ deutlich über dem Hefenbesatz des hier untersuchten Sorghummaterials mit $2,4E+04$ liegt.

Der Temperaturanstieg durch mikrobielle Tätigkeit ist ein deutliches Zeichen für stoffliche Veränderungen der Silagen. Auf Grundlage des linearen Zusammenhangs zwischen Temperaturerwärmung und Trockenmasseverlust leitet HONIG (1975, 1999) eine Berechnung des Trockenmasseverlustes in Abhängigkeit der Temperaturerwärmung ab. Die Berechnung der **HONIG-Trockenmasseverluste** wurde für alle Silagen vorgenommen und mit den Rückwaagen (Frischmasse) der HONIG-Einwaagen verglichen. Unterstellt wurde für den Vergleich die Konstanz der Feuchtemenge. Der Bilanzvergleich über HONIG-TEST berechnet sowie über Rückwaage ermittelt zeigt Deckungsgleichheit. Die Berücksichtigung der Trockenmassekorrektur, die zu veränderten Trockenmasseeinwaagen sowie zu veränderten Faktoren in der HONIG-Berechnung führt, ergibt im Bilanzvergleich keine Veränderung. Zum Bilanzzeitpunkt IIIb, nach dem ersten Temperaturmaximum, konnten Trockenmasseverluste zwischen 6,6 % und 13,7 % ermittelt werden. Mit 37,9 % wurden die höchsten Trockenmasseverluste beim Silierversuch SV 5 nach 258 Std. aerober Exposition ermittelt. RANJIT (2002) gibt eine Spannweite von 5,3 bis 9,9 % Trockenmasseverluste nach 3 Tagen aerober Exposition an. Bei Lagerung unter Luftsauerstoffeinfluss bis zu 7 Tagen werden von HONIG (1979) und PAHLOW (1990) TM-Verluste von 11% ermittelt.

Verlusthöhen die zum Bilanzzeitpunkt IIIc aufgetreten sind, können ebenfalls von WOOLFORD et al. (1978) bestätigt werden, bei aerober Lagerung traten hier TM-Verluste von über 25 % auf.

5.4.4 Stoffliche Veränderungen durch Luftexposition

Die untersuchten Kontrollsilagen zeigten bei Exposition an Luftsauerstoff einen annähernd sofortigen **Abbau der leichtverfügbaren Gärsäuren** und Alkohole. Auffällig ist, dass schon vor dem ersten Temperaturmaximum der Gehalt an Säuren und Alkoholen um ca. die Hälfte reduziert wird. Bei Untersuchungen von MARTENS (2006) wurde der Gehalt an Milchsäure ausgehend von 4,2 mg/mL auf 2,4 mg/L (-43%) nach 71 Stunden und bis zum Zeitpunkt 168 Stunden vollständig abgebaut. Der Abbau der Säuren deckt sich mit den in der Literatur beschriebenen Stoffwechselvorgängen von Hefen (FREDLUND, 2004). MIDDELHOVEN & FRANTZEN (1986) ermittelten einen gesteigerten Milchsäureabbau bei niedrigen pH-Werten. MARTENS (2006) ermittelt ebenfalls die höchste Umsatzrate von Milchsäure beim Hefenstamm *I. orientalis* gefolgt von *Pichia anomala*. Milchsäure als alleinige Kohlenstoffquelle kann von *Saccharomyces cerevisiae* kaum umgesetzt werden.

Veränderungen im Gärsäuremuster während aerober Exposition werden von verschiedenen Autoren beschrieben (HONIG, 1975), (RANJIT, 2002), (MARTENS, 2006). HONIG (1975) ermittelt während der Nachgärung von Gras im ersten Schritt der Umsetzung eine Veränderung der Gärsäuren und Alkohole. Bei niedrigen Nachgärverlusten reichert sich zuerst Essigsäure auf Kosten des Alkohols an, im weiteren Verlauf wurden dann alle Säuren abgebaut. *Acetobacter* als Auslöser des aeroben Verderbs, wie von SPOELSTRA & WOOLFORD (1988) und COURTIN (1990) an Simulationsmodellen beschrieben, kann in den hier untersuchten Silagen ausgeschlossen werden. Eine Anreicherung von Essigsäure konnte in den Kontrollsilagen nicht beobachtet werden. *Acetobacter* verstoffwechseln verschiedene Kohlenstoffquellen über den Zwischenschritt der Essigsäurebildung. *Acetobacter* als Auslöser des aeroben Verderbes können nach OUDE-ELFERINK (1999) als gering eingeschätzt werden. NISHINO (2009) erachtet die Möglichkeit der Verbesserung der aeroben Stabilität durch *Acetobacter* durch die Bildung von Essigsäure.

Im Gegensatz zu den untersuchten Kontrollsilagen kam es bei Exposition der behandelten Silagen nicht zu einem Abbau aller Säuren, sondern zu einer **Verschiebung im Gärsäuremuster**. Es erfolgte eine Verringerung des Milchsäuregehaltes bei gleichzeitigem Anstieg des Essigsäuregehaltes. Dieser Effekt ist nicht signifikant, tritt aber mehr oder weniger deutlich bei allen Versuchen auf. Ursächlich hierfür könnten die im Siliermittel enthaltenen heterofermentativen MSB sein. CONDON (1983) berichtet, dass verschiedene MSB unter mikro-aerophilen Bedingungen Stoffwechsel betreiben können und unter Sauerstoffeinfluss ein größeres Substratspektrum umsetzen können CONDON (1987). So kann *L. plantarum* in Gegenwart von Sauerstoff Milchsäure zu Essigsäure umsetzen MURPHY & CONDON (1984). PAHLOW (1985) ermittelt eine gesteigerte Aktivität der MSB und dadurch eine Regulierung des Hefenbesatzes während der Silierung bei einer täglichen Sauerstoffzugabe von $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Trockenmasse. Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt MARTENS (2006). Bei Untersuchungen des mikrobiellen Status während des aeroben Stabilitätstestes stellt Sie

einen Konkurrenzkampf zwischen MSB und Hefen fest, der sich in einer höheren MSB-Zahl und einem verlangsamten Hefenwachstum ausdrückt. Durch anti-mykotische Behandlung konnte die Autorin ebenfalls eine Milchsäureoxidation durch Bakterien nachweisen MARTENS (2006). Die mit *L. buchneri* behandelte Silage zeigte in einem Versuche von ADESOGAN (2003) keinen signifikant höheren Essigsäuregehalt, aber unter aerober Exposition einen geringeren aeroben Verderb. Der Autor vermutet einen Umbau der Milchsäure im oxidativen Milieu durch *L. buchneri*. Ein Anstieg von Essigsäure von 3,6 % TM auf 5,64 % TM (+57%) bei aerober Exposition von 1,5 Tagen wird von RANJIT (2002) dargestellt. Der Anstieg wird vom Autor auf weitergehende Stoffwechselaktivitäten des zugegebenen *L. buchneri* Siliermittels zurückgeführt, da die Höhe des Säureanstiegs nicht mit den ermittelten Trockenmasseverlusten übereinstimmt. Dieser erhebliche Anstieg kann aus der hohen Dosierung mit $1,0E+06 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ FM resultieren, eine Dosierung mit $1,0E+05 \text{ KbE} \cdot \text{g}^{-1}$ FM führte im selben Versuch zu einem geringeren Anstiegen der Essigsäure (+31 %) nach einem Tag aerober Exposition. Die maximale Konzentration an Milch- und Essigsäure wurden von RANJIT (2002) nach 1 bzw. 1,5 Tagen aerober Exposition ermittelt. Die in dieser Arbeit höchsten Konzentrationen werden nach 4 Tagen aerober Exposition gemessen, dies deckt sich weiterhin mit RANJIT, da am Tag 4 in seinen Versuchen ebenfalls noch höhere Säuregehalte gemessen werden als Zubeginn des Luftsauerstoffeinflusses. Die Unterschiede im zeitlichen Auftreten der Gehaltsmaxima können aus den größeren zeitlichen Differenzen zwischen den Analysen zurückgeführt werden.

Die hier vorliegenden Versuche zeigen, dass das Verhalten von Silagen unter aerober Exposition abhängig ist von einer vorherigen Beimpfung des Erntematerials mit einem MSB-Produkt. In Abhängigkeit des heterofermentativen Siliermitteleinsatzes zeigen sich signifikante Unterschiede im Gär säureverlauf über den Zeitraum der aeroben Exposition.

Zum Bilanzzeitpunkt IIIa wurde bei der Silage Silierversuch 2 mit Siliermittelzugabe eine Reduktion der Gärbestandteile ermittelt, zum Bilanzzeitpunkt IIIb hingegen ein Gehalt oberhalb des Silagematerials ohne Luftstress-Einfluss. Dies kann aus der Streuung des aeroben Verderbes innerhalb der Honig-Dosen resultieren. Es ist anzunehmen, dass der Gehalt an Säuren und Alkoholen zum Zeitpunkt IIIb oberhalb der in Tabelle 32 dargestellten 2,8 % liegt.

Als Auslöser der Nacherwärmung werden Hefen gesehen, die durch Verstoffwechselung von Milchsäure den pH-Wert anheben und hierdurch andere Gär schädlinge am aeroben Abbau beteiligen. Die ermittelten Daten zeigen die Möglichkeit einer Substratkonkurrenz zwischen verderbeinleitenden Hefen sowie dem bei der Silierung zugegebenen *Lactobacillus Buchneri* Stamm. Durch die Möglichkeit, während der aeroben Exposition Milchsäure zu Essigsäure zu verstoffwechseln, kann es zwischen *L. buchneri* und den epiphytischen Hefen zu einer Substratkonkurrenz kommen. Gleichzeitig wird ein Stoffwechselprodukt gebildet, das effektiver gegen Hefen wirkt als Milchsäure. Unterstützt wird dies durch die im Silierversuch 4 und 5 ermittelten MSB-Verläufe über den Silierzeitraum. Bei Öffnung der Silage konnten bei heterofermentativer Behandlung gegenüber den unbehandelten Silagen ein hoher Besatz mit Milchsäurebakterien ermittelt werden. Diese konnten in der vorliegenden Arbeit nicht weiter differenziert werden, anhand des steigenden Essigsäuregehaltes kann aber

vermutet werden das es sich hierbei um den zugesetzten heterofermentativen *L.buchneri* Stamm handelt.

Diese Erkenntnis kann als Erklärungsansätze für Silagen dienen, die mit einem heterofermentativen Siliermittel behandelt wurden und aerob stabil sind, ohne dabei signifikante Veränderungen des Gär säuremusters der Silage aufzeigen.

Untersuchungen von HONIG (1975) zeigen, dass es bei fortschreitendem Verderb zu **Veränderungen in den Inhaltsstoffen** der Silage kommt. Die Gehalte an N-freien Extraktstoffen gehen zurück, dementsprechend erhöhen sich die Gehalte an Rohfaser, Rohprotein und Asche. Gehen die Umsetzungen weiter, wird die Rohfaser angegriffen und es erfolgt ein kräftiger Anstieg des Aschegehaltes. Der Abbau der Rohfaser kann bestätigt werden, wobei bis zu 109 Stunden aerobe Exposition (Entnahmezeitpunkt IIIb) keine Veränderung eintritt, zum Entnahmezeitpunkt IIIc (223 Stunden) der Rohfasergehalt im Mittel um ca. 5 % abnimmt. Die Abnahme zum Entnahmezeitpunkt IIIc streut dabei erheblich, so nimmt bei Silierversuch 2 schon nach 160 Stunden der Rohfasergehalt um 10%-Punkte ab, bei Silierversuch 1 nach 288 Stunden nur um 3,6%-Punkte ab.

Ein deutlicher **Anstieg der Gehalte der Faserfraktion** (incl. ADF und NDF) zeigt sich bei allen Silagen mit Erwärmung. Im Mittel stieg der Gehalt der Rohfaserfraktion zum Bilanzzeitpunkt IIIc um 26,6%, am deutlichsten bei der unbehandelten Kontrollsilage SV 4. Ein Anstieg der Fasergehalte nach 7 Tagen aerober Exposition wird ebenfalls von SANDERSON (1993) ermittelt. Der Fasergehalt steigt bei Maissilage um + 9% für NDF und um 8 % für ADF. Bei aerober Lagerung von Sorghumsilage erhöhen sich der NDF-Gehalt um 6 % und der ADF-Gehalt um 2 %. Der Anstieg der Fasergehalte ist dabei auf den Abbau der wasserlöslichen Kohlenhydrate zurückzuführen die bei SANDERSON (1993) um 22 – 63 % reduziert werden.

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen unter Berücksichtigung des Trockenmasseabbaus zeigt sich, dass es trotz Anstiegs der Gehalte zu einem Abbau von Teilen der Faserfraktion kommt. Es stellt sich hierbei eine Rangierung der Faserfraktion ein. Nur geringe Änderungen finden am Entnahmezeitpunkt IIIb statt, wobei die NDF-Fraktion vor der ADF-Fraktion und der Rohfaserfraktion den größten Veränderungen unterliegt. Gleiches gilt für den Bilanzzeitpunkt IIIc aber mit erheblich größeren Abbaugraden (Tabelle 44).

Tabelle 43 Verbliebener Rest der Faserfraktionen zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc

Faserfraktion	Entnahmezeitpunkt IIIb Ø 109 Stunden	Entnahmezeitpunkt IIIc Ø 223 Stunden
Rohfaser	99,5 %	95,1 %
ADF	98,2 %	94,9 %
NDF	93,5 %	90,6 %

Ursächlich für die Rangierung der beiden Faserfraktionen ADF und NDF sind in der Konventionsanalytik zu suchen. Die säure-lösliche Faserfraktion (ADF), enthält mehr Anteile des

unvergärbaren Lignins, dieser ist nur schwer und nur über längere Zeiträume, abbaubar. Die NDF-Fraktion beinhaltet die Hemicellulose die mikrobiell leichter abbaubar ist OTTOW (1997).

Tabelle 44 Steigende Rohfasergehalte und sinkende Methanausbeuten (rechnerische Bestimmung nach WEISSBACH (2008) bei konstantem TM-Gehalt)

Rohfasergehalt in % TM	15	20	25	30	35
Methanbildung LN CH ₄ / kg TM _{kor.}	361	344	324	302	278

Aus Tabelle 44 ersichtlich, führen steigende Rohfasergehalte bei der rechnerischen Bestimmung der Methanausbeute nach WEISSBACH (2008) zu sinkenden Erträgen. OHLY (2006) vergleicht die im Gärttest ermittelten Gasausbeuten mit theoretischen Gasausbeuten nach Futterwerttabelle (DLG 1997) und kommt bei rohfaserreichen Substraten auf erhebliche Mindererträge. Mit KULAP-Gras konnte in kontinuierlichen Gärversuchen nur ein Methanertrag von 205 bzw. 246 L_N / kg oTS erzielt werden. Dies entspricht im Mittel nur 55% des theoretischen Potentials von 415 L_N / kg oTS berechnet aus den Inhaltsstoffen mit einem Rohfaseranteil von 37 %. Weizenstroh mit einem Rohfasergehalt von 42% erzielte in kontinuierlichen Gärversuchen nur 38% gegenüber dem theoretischen Potential.

Im zeitlichen Verlauf der aeroben Exposition erfolgt eine geringere Anreicherung der NDF-Fraktion gegenüber der ADF-Fraktion. Dies resultiert aus einem teilweise erfolgenden mikrobiellen Abbau der NDF-Fraktion. Der ADF-Gehalt beinhaltet aus der Konventionsanalytik heraus mehr Anteile des unvergärbaren Lignins, weshalb ein steigender ADF-Gehalt mit einer geringeren Gasbildung (schlechteren Ausbeute) einhergeht. KAISER (2007) ermittelt für steigende ADL-Gehalte niedrigere Methanausbeuten. Im Allgemeinen kann bei einer Anreicherung der Faserfraktion von einer Verschlechterung der Vergärung ausgegangen werden.

Der **Stärkegehalt** unterlag zu Beginn der Nacherwärmung nur kleineren Veränderungen, mit fortschreitenden Nacherwärmungsverlusten erfolgt auch ein Abbau der Stärke. Zum Bilanzzeitpunkt IIIc kann bei den Silagen Silierversuch 2 und 4 eine Abnahme des Stärkegehaltes um annähernd 30% ermittelt werden. Die Silagen Silierversuch 1 und 3 zeigen keine deutliche Abnahme des Stärkegehaltes. Die Ermittlung der Stärkegehalte ist mit der hier durchgeführten spektroskopischen Analytik von verdorbenem Material größeren Schwankungen unterworfen. Die vorliegenden Daten unterstützen aber die Ergebnisse von HONIG (1975), dass Stärke erst mit späterem Verderb abgebaut wird. Aus Untersuchungen zum Einfluss von Hefen auf den aeroben Verderb stellt Middelhoven fest, dass Hefen Stärke nicht assimilieren können (MIDDELHOVEN & FRANZEN, 1986).

5.5 Gasertrag zu unterschiedlichen Bilanzzeitpunkten

5.5.1 Bilanzzeitpunkt II (ohne aerobe Exposition)

Die in der Literatur angegebenen Gaserträge beziehen sich in der Regel auf Material direkt aus der Silierung ohne Beeinflussung von Luftsauerstoff. In der hier vorliegenden Arbeit entspricht dies dem Bilanzzeitpunkt II. Die ermittelten Methanerträge von 301 – bis 335 L_N / kg TM_k werden für Maissilage in der Literatur vielfach bestätigt, wobei beachtet werden muss, dass nicht alle Gaserträge von den Laboratorien auf die korrigierte Trockenmasse bezogen werden (MUKENGELE, 2007), (KTBL, 2007), (HERRMANN, 2008). Ohne Berücksichtigung der leicht flüchtigen Bestandteile werden die Gaserträge pro kg Trockenmasse überschätzt (WEISSBACH, 2008). Eine rechnerische Ermittlung des Gasertrages nach WEISSBACH (2008) unter Berücksichtigung des Rohfaser- und Aschegehaltes zeigt bis auf den Silierversuch SV 4 eine gute Übereinstimmung mit den im Batch-Versuch ermittelten Methanerträgen (Tabelle 45). Beachtet werden muss, dass verfahrenstechnische Einflüsse (Zerkleinerung, Gärsäuremuster, etc.) durch die Formel nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 45 Gegenüberstellung ermittelten Gaserträge zum Bilanzzeitpunkt II der Kontrollsilagen und der nach WEISSBACH (2008) berechneten Gaserträge

Maismaterial / Parameter	SV 1	SV 2	SV 3	SV 4
Batch-Ergebnis $L_N CH_4$ / kg TM_k	319	335	331	301
aus FoTS $L_N CH_4$ / kg TM_k	322	342	330	342

5.5.2 Bilanzzeitpunkt III (mit aerober Exposition)

Der Einfluss der aeroben Lagerung auf die Gasausbeute wurde durch Bestimmung des Gasertrages zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc ermittelt. Die so ermittelten Gaserträge wurden ins Verhältnis gesetzt zum Gasertrag am Bilanzzeitpunkt II ohne aeroben Einfluss. Die aerobe Lagerung in Verbindung mit Erwärmungsverlusten führt zu einem Minderertrag in der Gasbildung. Die Kontrollsilagen zeigen am Bilanzzeitpunkt IIIb signifikante **Methanverluste** von 9,1 bzw. 15,9 %. Die Methanverluste der behandelten Silage Silierversuch 1 & 4 wurden mit 7,8 % bzw. 1,4 ermittelt, sind aber statistisch nicht signifikant. Die bei Silierversuch 5 berechneten Methanverluste von 6,1 % (IIIb) und 6,3 % (IIIc) resultieren aus Schwankungen der Batch-Bestimmung, da es im Rahmen der aeroben Exposition bei dieser Silage, zu keiner Erwärmung kam. Am Bilanzzeitpunkt IIIc zeigen alle unbehandelten Kontrollsilagen signifikante zweistellige Methanverluste. Die Verluste schwanken zwischen 16,9% (Silierversuch 3) und 42% (Silierversuch 1 & 5), im Mittel liegen die Verluste bei 28,5 %. Konnte durch die Behandlung mit dem heterofermentativen Siliermittel die Nacherwärmung verhindert werden, zeigen sich keine signifikanten Minderungen im Gasertrag. Die Behandlung bei

SV 1 verringerte die Verluste gegenüber der unbehandelten Kontrolle, führte aber ebenfalls zu einem Minderertrag.

Die im Rahmen der Praxisversuche bestimmten Methanverluste belaufen sich im Mittel auf 9,3 % mit erheblichen Schwankungen. Deutlich ist hier die Abhängigkeit der Methan- und Trockenmasseverluste vom Hefenbesatz erkennbar.

Tabelle 46 Ermittelte Methanverluste und theoretische Methanverluste durch Säureabbau

Parameter / Maismaterial	IIIb		IIIc	
	aus Batch	theor. Gasmenge aus Säuren	aus Batch	theor. Gasmenge aus Säuren
SV 1	40	54,79 (>100%)	134	54,79 (40,9%)
SV 2	n.b.	n.b.	63	39,5 (62,7%)
SV 3	n.b.	n.b.	56	43,37 (77,5%)
SV 4	28	11,1 (39,6%)	87	44,18 (50,78%)

n.b. = nicht bestimmt

Die im Batch-Versuch ermittelten Differenzen im Methanertrag zwischen Silagen mit und ohne Luftexposition kann nur zu einem mittleren Prozentsatz von 54,3% aus dem Abbau der Gärsäuren erklären werden (Tabelle 46). Unberücksichtigt bleibt hierbei der Gasertrag von Silierversuch 1 zum Bilanzzeitpunkt IIIb, da das Gaspotential der abgebauten Säuren über der im Batch ermittelten Differenz liegt. Ursächlich hierfür können die systembedingten Ungenauigkeiten im Batch sein. Durch die Bilanzierung von Milchsäure, flüchtigen Fettsäuren, Rohprotein sowie wasserlöslichen Kohlenhydraten konnte WOOLFORD (1978) nur 20 – 32% der Trockenmasseverluste über eine aerobe Exposition von 15 Tagen erklären. Einen Abbau der wasserlöslichen Kohlenhydrate von 3,68 % TM auf 1,35 % konnten bei RANJIT (2002) nur einen Bruchteil der Trockenmasseverluste von 5,3 % nach 3 Tagen aerobem Exposition erklären. Die weiteren Trockenmasseverluste resultieren nach WOOLFORD et al. (1978) aus dem Abbau höher polymerisierter Kohlenhydrate, die ständig die wasserlöslichen Kohlenhydrate ergänzen. Eine Ableitung der Methanverluste aus dem Gärsäureabbau ist somit nicht möglich.

Von HONIG (1999), PAHLOW (2000) sind Tafeln zu Trockenmasseverlusten durch Lufteinfluss während der Entnahme erstellt worden. Als Variationsgrößen werden von PAHLOW (2000) der Einfluss der Entnahmetechnik und Siliertechnik sowie die Dauer der Zwischenlagerung auf den Trockenmasseverlust berücksichtigt. Es ergeben sich bei festem Siloanschnitt und guter Entnahmetechnik TM-Verluste von 0,1 % pro Tag gegenüber einem TM-Verlust von 2,0 % bei lockerem Anschnitt und einer mäßigen Entnahmetechnik. In Abhängigkeit des TM-Gehaltes und der

Erhöhung der Silagetemperatur gegenüber Umgebungstemperatur entstehen tägliche TM-Verluste von 1,2 – 3,5 % PAHLOW (2004). Feuchtere Silagen führen hierbei zu höheren Verlusten. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Methanverluste von 0,15 % • h⁻¹ entsprechen einem Methanverlust von 3,6 % pro Tag und decken sich mit den von PAHLOW (2004) beschriebenen TM-Verlusten bei einer Erwärmung der Silage über eine Dauer von einem Tag.

5.6 Verhalten verschiedener Silage-Gärprodukte im Biogasprozess

5.6.1 Batch-Versuch

Bei der einmaligen Zugabe der Kohlenstoffquellen Glucose, Essigsäure und Milchsäure wurde die Gasbildung sowie das Gär säuremuster im Fermenter täglich ermittelt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede im Abbau und in der Gasbildung zwischen Milchsäure und Essigsäure. Auffällig ist der Abbau der Milchsäure über Propionsäure der sich aus der Umkehrung der β -Oxidation erklärt. Die Biogasbildung setzt bei Milchsäurezugabe erst 2 Tage später als bei Essigsäure und Glucosezugabe ein.

5.6.2 Fed-Batch-Versuch I

Essigsäure und Propionsäure erzielen einen Abbaugrad von 86%, Glucose von 80% und Milchsäure den schlechtesten Abbau mit nur 62%. Eine unvollständige Umsetzung des theoretischen Potentials von Kohlenstoffquellen zu Biogas kann verschiedene Ursachen haben. Ein Teil der eingebrachten Energie wird in Biomasse fixiert, oder in Form von Wärme abgegeben. Die Abbaugrade von Essigsäure und Propionsäure liegen im Rahmen der Ausnutzungsgrade die GALLERT (1998) und McINERNEY & BRYANT (1979) schätzen. Milchsäure liegt erheblich unter diesen Werten. Da die Versuchsdauer 17 Tage betrug, besteht die Möglichkeit, dass noch ein Teil der potentiellen Energie in Form von Biomasse im Fermenterschläm vorhanden ist und nicht vollständig umgesetzt wurde. Ein weiterer Erklärungsansatz kann im erweiterten Umbauschritt von Milchsäure über Propionsäure gesucht werden. Bei jedem Stoffwechselvorgang und mit steigender Anzahl an Mikroorganismen die am Abbau beteiligt sind steigen die Verluste durch Biomasseneubildung und Wärmeverluste. Gerade die Selbsterwärmung von Biogasanlagen wird oftmals unterschätzt (LINDORFER, 2007)

5.6.3 Fed-Batch-Versuch II

Bei der semi-kontinuierliche Vergärung über 23 Tage wurde die Entwicklung des Gär säuremusters bei Zugabe von reinen Kohlenstoffquellen untersucht. Es zeigt sich deutlich, dass bei Vergärung von Essigsäure keine weiteren Intermediaten gebildet werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der vorherigen Zufütterungsergebnisse die eine sofortige Umsetzung der Essigsäure zeigen. Die Vergärung von Milchsäure führt zu einem Gär säuremuster mit verschiedenen Abbau- und Zwischenprodukten. Mit einem Anteil von 30% an der Summe der Gär säuren stellt Propionsäure den Hauptabbauweg von Milchsäure dar.

Die im Rahmen der Zufütterungsversuche ermittelten Unterschiede zwischen den einzelnen Silage-Gärprodukten konnte nicht im vollen Umfang in den Vergärungsversuchen der Silagen gefunden

werden. Dies kann an der geringen zeitlichen Auflösung (zwischen 2 und 4 Tage) der Gasmessung bei der Batch-Vergärung der Silage resultieren. Eine weitergehende Überprüfung des Einflusses des Gärsäuremusters auf die Biogasgestehung sollte in kontinuierlichen Versuchen ermittelt werden. Die hier dargestellten Ergebnisse lassen vermuten, dass bei Fermentern mit hoher Raumbelastung, kurzen Verweilzeiten oder Fermentern mit hohen Säurefrachten die heterofermentative Silierung weitere Vorteile bringt.

Kritisch bleibt anzumerken, dass die auftretenden Stoffwechselwege des anaeroben Abbaus abhängig sind von der mikrobiellen Population im Fermenter. Aussagen zur Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose in Biogasanlagen sind auf Grund wechselnder Randbedingungen (Substrate, Temperatur, etc.) nur schwer möglich. Die hier dargestellten Ergebnisse sind darum in erster Linie auf die eingesetzten Inocula beschränkt.

5.7 Ausblick

Die Optimierung der Substratbereitstellung ist ein Schlüsselfaktor für den wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen und wird für die Zukunft, durch die sich weiter verschärfende Nutzungskonkurrenz agrarischer Produkte, an Wichtigkeit gewinnen. Die derzeitige Leitkultur für die Biogaserzeugung stellt Mais dar. Verschiedene Forschungsvorhaben zeigen aber auch deutliche Entwicklungspotentiale alternativer Energiepflanzen und Zweikulturen-Nutzungssysteme auf, insbesondere vor den zukünftigen Herausforderungen, einer unsicheren klimatischen Entwicklung. Die Entwicklung und Etablierung angepasster Konservierungstechniken muss hierbei gleichrangig als Forschungsziel berücksichtigt werden. Die Akzeptanz neuer Fruchtfolgen und Energiepflanzen ist neben der Ertragssicherheit wesentlich von der lagerstabilen und praxistauglichen Konservierung des Erntematerials abhängig. Die derzeitige Praxissituation der Lagerung und Konservierung von Biomasse für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung spiegelt die steigenden Anforderungen nicht wider.

Zukünftig ist es weiterhin erforderlich, für die Bestimmung der flächenspezifischen Energieausbeute die Verlustgrößen der Biomassebereitstellung unter Praxisbedingungen zu ermitteln. Hier ist insbesondere der Einfluss der gestiegenen Erntemengen auf die Verlustgrößen in der Praxis zu ermitteln. Die derzeit angesetzten Verlustgrößen für Restatmung, Sickersaft, etc. wurden aus kleineren Silogrößen ermittelt und müssen kritisch hinterfragt werden.

Neben der verlustarmen Substratbereitstellung rückt der Voraufschluss des Substrates als Zusatzfunktion bei der Silierung in den Focus. Derzeit werden bei optimaler Ausbeute ca. 80-90 % der organischen Substanz im Biogasprozess verwertet. Eine mögliche Verbesserung dieser Ausbeute durch den Einsatz von Enzymen oder speziellen Bakterien muss in weitergehenden Forschungsprojekten evaluiert werden.

Die in verschiedenen Entwicklungsszenarien unterstellten Steigerungen in der Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen und hier insbesondere der Biogaserzeugung kann nur durch die Optimierung aller am Prozess beteiligten Verfahrensschritte erfolgen. Die Silierung der Biomasse

nimmt hierbei eine zentrale Rolle zwischen Flächenertragssteigerung und Optimierung des Vergärungsprozesses ein.

6 Schlussfolgerungen und Thesen

Die verlustarme Substratbereitstellung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Energieverluste bei der Substratbereitstellung können durch eine angepasste Silierung und Verfahrenstechnik vermieden werden.

Der Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute wurde über die gesamte Verfahrenskette der Biomassebereitstellung untersucht. Als Varianten wurden im Rahmen von Bilanzversuchen, unbehandelte und heterofermentativ behandelte Maissilagen untersucht. Der Bilanzrahmen umfasst Gärgasverluste sowie Verluste durch aerobe Exposition. Zusätzlich wurden verschiedene Erntematerialien betrachtet (Mais & Sorghum). Der Einfluss der Nacherwärmung auf die Methanausbeute wurde in Batch-Versuchen quantifiziert. Weiterhin wurden ausgesuchte Gärprodukte auf ihre Wirkung im Biogasprozess untersucht.

Aus den Schlussfolgerungen und Ergebnissen werden nachfolgende Thesen abgeleitet:

1. Der Einsatz des heterofermentativen Siliermittels führte nur zu einer geringen Erhöhung der Gärgasverluste während der Silierung. Im Mittel betrug die Erhöhung 1,3 % TM, nur in drei von fünf Bilanzversuchen waren die Differenzen statistisch signifikant. Durch die Bildung energiereicher Endprodukte bei der Silierung kann kein negativer Effekt durch erhöhte Trockenmasseverluste bei der heterofermentativen Silierung auf den Gasertrag festgestellt werden. Ohne Luftsauerstoffeinfluss gibt es zwischen beiden Varianten nur geringe Differenzen, teilweise ergeben sich höhere Methanerträge bei heterofermentativer Silierung. Im Ganzen sind die ermittelten Gärgasverluste als gering einzustufen. Die Berechnung der Trockenmasseverluste durch Silierung nach einschlägigen Formeln zeigte gegenüber den gemessenen Werten teilweise hohe Abweichungen. Die Ursache kann in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden.
2. Der teilweise hohe epiphytische Besatz an Hefen im Ausgangsmaterial wurde bei Einsatz des Siliermittels bis auf die Nachweisgrenze reduziert. Die unbehandelten Kontrollen zeigten demgegenüber einen hohen Hefen Besatz im silierten Material. Die eingesetzten heterofermentativen MSB wirken effektiv auch gegen einen hohen Hefenbesatz.
3. Bei Öffnung der Silagen an Tag 90 kann bei den behandelten Silagen noch ein erheblicher Keimbesatz an MSB nachgewiesen werden. In Zusammenhang mit dem erhöhten Essigsäuregehalt spricht dies für eine höhere Durchsetzungsfähigkeit der zugegebenen MSB-Stämme.
4. Der Einsatz des heterofermentativen Siliermittels führte zu signifikanten Unterschieden im Verhalten bei aerober Exposition. Die aerobe Stabilität der behandelten Silagen wurde signifikant verbessert. Die unbehandelten Mais-Silagen zeigten nur eine geringe aerobe Stabilität von im Mittel 57 Stunden. Zwei unbehandelte Sorghum-Silagen zeigten eine aerobe Stabilität von 97 Stunden. Der durch epiphytischen MSB-Besatz entstandene Essigsäuregehalt

war in allen Fällen nicht ausreichend um die aerobe Stabilität signifikant zu erhöhen. Die aerobe Stabilität der behandelten Silagen lag in allen Fällen signifikant über der entsprechenden Kontrolle, teilweise konnte im Untersuchungszeitraum von bis zu 12 Tagen keine Erwärmung gemessen werden.

5. Im Verlauf der aeroben Exposition kam es zu einer Veränderung des Gär säuremusters der Silagen. Alle Gärprodukte der unbehandelten Silagen wurden ohne Präferenz abgebaut. Die heterofermentative Silierung führte bei aerober Exposition zu einem weitergehenden Aufbau von Essigsäure, in den vorwiegenden Fällen zu Ungunsten des Milchsäuregehaltes. Die zugegebenen Milchsäurebakterien können somit unter aeroben Bedingungen eine Substratkonkurrenz zu Hefen darstellen.
6. Durch die Bestimmung des Methanertragspotentials von Silagen vor und nach aerober Exposition konnten signifikante Mindererträgen durch Nacherwärmung ermittelt werden. Mit beginnender aerober Instabilität entstehen bei Erwärmung Methanverluste von 3,6 % pro Tag.
7. Bei der Vergärung typischer Silagegärprodukte zeigten sich unterschiedliche Abbauewege und Abbaugrade. Die Vergärung von Milchsäure in Batch- und Fed-Batch-Versuchen führte zu einer ausgeprägten Kumulation verschiedener Gär säuren im Batch-Fermenter. Dem Gegenüber zeigte die Vergärung von Essigsäure keine Kumulation von Zwischenprodukten im Biogasprozess.

Unter Luftsauerstoffeinfluss unterliegen Silagen stofflichen und chemischen Veränderungen. Energiereiche Konserven zeigten unter aerober Exposition signifikante Methanverluste. Folglich sollte der Lufteinfluss durch verfahrenstechnische Maßnahmen (großer Vorschub, kleine Anschnittfläche, hohe Verdichtung, etc.) so gering wie möglich gehalten werden, oder die aerobe Stabilität durch den Einsatz von Siliermitteln mit der Wirkungsrichtung II erhöht werden. Die Erhöhung des Essigsäuregehaltes durch heterofermentative Silierung führt hierbei zu aerob stabilen Silagen. Das heterofermentative Gär säuremuster kann im Fermenter ohne Anreicherung von Zwischenprodukten sehr gut abgebaut werden.

7 Literatur

- ADAMS, MR., HALL, CJ., (1988): Growth inhibition of foodborne pathogens by lactic and acetic acids and their mixtures. *Int. J. Food Sci Technol.* 23:287 - 291
- ADESOGAN, A.T. (2006): Factors Affecting Corn Silage Quality in Hot and Humid Climates. *Florida Ruminant Nutrition Symposium*
- ADESOGAN A.T., SALAWU, M.B., ROSS, A.B., DAVIES, D.R., BROOKS, A.E. (2003): Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus fermentum*, *Leuconostoc mesenteroides* inoculants or a chemical Additive on the Fermentation, Aerobic stability, and Nutritive Value of Crimped Wheat Grains, *J. Dairy Sci.* 86: S.1789-1796
- ADLER, A. (2002): Qualität von Futterkonserven und mikrobielle Kontamination. 8. Alpenländisches Expertenforum, 9.-10. April 2002, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, S.17 - 26
- ADLER, A., LEW, H., (1995): Dynamik der epiphytischen Mikroflora auf Grünlandpflanzen im Zusammenhang mit verschiedenen Düngungsvarianten
- ADLER, A., BERGER, C., NEUHAUSER, J. LEW, H., (1997): Dynamik der epiphytischen Milchsäurebakterienflora auf Grünlandpflanzen vom Feldbestand bis zur Silage, *Die Bodenkultur* 48(3), S. 165-171
- AMON, Th. et al., (2006): Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem. In *Berichte aus der Energie- und Umweltforschung* 80/2006
- ANDREE, H., (2009): On-Line Prozessanalyse mit NIRS. In *VDI Berichte* 2057 S. 209 – 220 im Rahmen der Fachtagung Biogas 2009 Energieträger der Zukunft, Stuttgart 24-25.6.2009. VDI Verlag
- Anonym (2006): Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. *VDI Richtlinie* 4630, Verein deutscher Ingenieure.
- Anonym (2008): Merkblatt Gülle-Festmist-Jauche-Silagesickersaft-Gärreste Gewässerschutz (JGS-Anlagen). Baden-Württemberg Umweltministerium für Ernährung und Ländliche Räume Stand August 2008
- ANONYM (2009): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), April 2009
- ASHBELL und LISKER (1988): Aerobic deterioration of maize silage stored in a bunker silo under farm conditions in a subtropical climate *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 45, 307-315
- AUERBACH, H., (1996): Verfahrensgrundlagen zur Senkung des Risikos eines Befalls von Silagem mit *Penicillium roquerforti* und einer Kontamination mit Mykotoxinen dieses Schimmelpilzes. Dissertation, Universität Stuttgart-Hohenheim
- BARNETT, J. A., PAYNE, R.W., YARROW, D., (2000): *Yeasts Characteristics and identification.* Cambridge University Press
- BATTENBERG, S. (2000): Mikrobiologische Untersuchungen zum Verbesserten Abbau von Schlamm aus Abwasserreinigungsanlagen durch Aufschluß. Dissertation an der Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- BASERGA, U., (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte* Nr. 512, S. 1-11

- BECK, T. und GROSS, F., (1964): Ursachen der unterschiedlichen Haltbarkeit von Gärfutter. Wirtschaftseigene Futter 10:298
- BECK, T. (1975): Beeinflussung der Nachgärung durch Siliermittel. Wirtschaftseigene Futter 21, 55-65
- BECK, T., GROSS, F., BECK, R., (1987): Untersuchungen zur Kenntnis der Gärfuttermikroflora. II. Mitteilung: Die Milchsäurebakterienflora von Silagen unterschiedlicher Qualität aus Praxisbetrieben. Wirtschaftseigene Futter 33: 34-43
- BEKKER, W. (2002): Untersuchungen zur Problematik der Nacherwärmung von Maissilagen, Erntejahr 2002. Diplomarbeit an der Fachhochschule Südwestfalen. Gemeinsames Projekt der LWK NRW und KWS Einbeck.
- BERG, K. (1971): Die Trockensubstanzbestimmung von Silagen und die Erfassung flüchtiger den Futterwert beeinflussender Verbindungen sowie Modellversuche zur Ermittlung des Gärverlustes. Dissertation, Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. Berlin
- BUCHGRABER, K., GINDL, G., DEUTSCH, A., (1994): Einfluss des Nutzungszeitpunktes bei der Silierung von Grünlandfutter. Veröff. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein 27, 1 - 38
- Bischofsberger, W., N. Dichtl, K.-H. Rosenwinkel, C. F. Seyfried, B. Böhnke (Hrsg.), (2005): Anaerobtechnik, 2. vollständige überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- Bolsen, K.K., Dickerson, J.T., B.E. Brent, R.N. Sonon, Fr., B.S. Dalke, C. Lin and J.E. Boyer, Jr., (1993): Rate and extent of top spoilage losses in horizontal silos. J. Dairy Science. 76:2940-2962
- BOLSEN, K.K., C. LIN und BRENT, B.E., (1992). Effect of Silage Additives on the Microbial Succession and Fermentation Process of Alfalfa and Corn Silages. Journal of Dairy Sci. 75: 3066 - 3083
- Buxton, D.R., Muck R.E., Harrison J.H., (2003): Silage science and Technology American Society of Agronomy Inc. Crop Science Society of America
- BUSWELL A. M., H. F. MUELLER, (1952): Mechanism of Methane Fermentation. Industrial and Engineering Chemistry, 44 (3), 550-552,
- BRUMMELER, E. t., POL, L. W. H., DOLFING, J. LETTINGA, G. und ZEHNDER, A. J. B. (1985): Methanogenesis in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor at pH 6 on an Acetate Propionate Mixture. Applied and Environmental Microbiology 49, S. 1472 - 1477
- Cai, Y., Y. Benno, M. Ogawa S. Kumai (1999): Effect of applying lactic acid bacteria isolated from forage crops on fermentation characteristics and aerobic deterioration of silage. Journal of Dairy Science 82:520-526
- CHUDASKE, C., (2006): Hefen – Gefahr aus dem Silo? Vortrag in Nossen am 29. März 2006
- CONWAY, E.J. und DOWNEY, M., (1950): pH values of the yeast cell. Biochem. J. 47:355 - 360
- CONDON, S. (1983): Aerobic metabolism of lactic acid bacteria. International Journal of Food Science and Technology, 7: 15 - 25
- CONDON, S. (1987): Response of lactic acid bacteria to oxygen. FEMS Micro-biol. Rev. 46: 269 - 280
- COURTIN, M.G. und Spoelstra, S. F., (1990): A simulation model of the microbiological and chemical changes accompanying the initial stage of aerobic deterioration of silage. Grass and Forage Science volume 45, 153-165

- DAESCHEL, M. A., ANDERSSON, R.E., FLEMING, H.P., (1987): Microbial ecology of fermenting plant materials. FEMS Microbiology Reviews 46, 357 - 363
- DANIEL, J., SCHOLWIN, F., (2008): Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland. Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Heidelberg, Leipzig, Berlin, Darmstadt
- DANIEL, P., Honig, H., Weise, F. und Zimmer, E., (1970): . Wirkung von Propionsäure bei der Grünfuttersilierung. Wirtschaftseigene Futter. 16:239-252
- DANNER, H., HOLZER, M., MAYRHUBER, E., BRAUN, R., (2003): Acetic Acid Increases Stability of Silage under Aerobic Conditions, Applied and Environmental Microbiology, S. 562 – 567
- DAWSON T. E., S. R. Rust, M.T. Yokoyama, (1996): 1996. Improved fermentation and aerobic stability of ensiled High moisture corn with the use of Propionibacterium acidipropionici. J. Dairy Sci. 81:1015 – 1021.s
- DBFZ, Autorenkollektiv (2009): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse, Zwischenbericht „Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse.
- De VUYST L. und VANDAMME E., (1994): Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria – Microbiology, Genetics and Applications. Antimicrobial potential of lactic acid bacteria. Blackie Academic & Professional, London, Chapter 3, pp. 91 – 129.
- DEDERER, M., (2008): Ökonomisch-rechtliche Grundlagen der Bigastechnologie. Tagung des Fachverbandes Biogas“EEG 2009 – Kleine Biogasanlagen“, Wolpertshausen, 28/29. November 2008-12-22
- DERNEDDE (1983): Der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Verdichtbarkeit von Gras in Lagerbehältern bei statischer Belastung, Landbauforschung Völkenrode, 33. Jahrgang, 4, S. 259-263
- DICHTL, N., (2005): Verfahrenstechniken zur Behandlung von Klärschlamm: W. Bischofsberger, N.Dichtl, K.-H. Rosenwinkel, C. F. Seyfried, B. Böhnke (Hrsg.): Anaerobtechnik, 2. vollständige überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- DLG, (2006): DLG-Richtlinie zur Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit DLG, Frankfurt a. M. Stand 12 / 06
- DMK (2008): Flächenertrag von Silomais für das Erntejahr 2008. <http://www.maiskomitee.de/web/intranetHomepages.aspx?hp=79B1850D-32BC-47E7-70EA-C83C69CD63A1> Stand: 8.2009
- DRIEHUS, F., Oude-Elferink, S. J.W. H. und Spoelstra, S. F., (1999): Anaerobic lactic acid degradation during ensilage of whole crop maize inoculated with lactobacillus buchneri inhibits yeast growth and improves aerobic stability. 1999 J. Appl. Microbiol. 87:585-594
- DRIEHUS, F., Oude-Elferink, S. J.W. H. und VAN WIKSELAAR, P.G. (2001): Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with Lactobacillus buchneri, with or without homofermentative lactic acid bacteria. Grass and Forage Science, 56, 330 - 343
- DRIEHUS, F., RADEMAKER J. L. W., WELLS-BENNIK und M. H. J., (2009): The occurrence of spores of Bacillus and Paenibacillus in silage. 15th. International Silage Conference, Conference Proceedings S. 377-378, Madison 2009

- DuBOURGUIER, H. C., ARCHER, D. B., ALBAGNAC, G. und PRENSIER, G. (1988): Structure and Metabolism of Methanogenic Microbial Conglomerates. In *Anaerobic Digestion 1988*, 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, S. 13 – 23. Editiert durch E. R. Hall und P. N. Robinson. Oxford: Pergamon Press
- ECOLOGIC, (2008): Biogasnutzung im ländlichen Raum. Der Beitrag verschiedener Anlagenkonzepte zur regionalen Wertschöpfung und ihre Umweltleistung. Institut für internationale und Europäische Umweltpolitik gGmbH
- Eder, (1998): Wundersorten gibt es nicht. DLG Mitteilungen 2 16-18; Reife Leistung Zeitschrift Mais 4 138-141
- EGGEN, R. I. L., de VOS, W. M., (1993): Molecular Biology of the Acetoclastic Methanogen *Methanotrix soehngenii* in Madeleine Sebald (Hrsg.): *Genetics and Molecular Biology of Anaerobic Bacteria*, Springer Verlag New York Berlin
- ENDO, A. (1955): Ensiling Process II. Ecological Aspects of Yeasts Actions in the silage process. *Tohoku Journal of Agricultural Research* V(4), S.291-303
- EHRMANN, T., KÖHNLEIN, M., (2008): Praxisvergleich Pfpfensstromfermenter vs. Rührkesselfermenter. Tagungsbeitrag: Biogas 2008 Innovationskongress 12.-13.6 Osnabrück, Tagungsband S. 10-13
- FREDLUND, E., (2004): Central Carbon Metabolism in the Biocontrol Yeast *Pichia anomala* – Influence of Oxygen Limitation. Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala
- FRICKE, K., HANGEN, H.O., LEONHARDT, W., (2000): Umsetzung der TASI Nachfolge-Verordnungen und Gütesicherung von Gärprodukten. Schriftenreihe des ANS 41, Wiesbaden, 273 S.
- FRITZ, T., (2008): Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen. Dissertation an der Universität Rostock, ISBN 978-3-86009-065-7
- FILYA, I., ASHBELL, G., HEN, Y., WEINBERG, Z.G. (2000): The effect of bacterial inoculants on the fermentation and aerobic stability of whole crop wheat silage. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 88:39 - 46
- FILYA, I., (2003): The effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the fermentation, aerobic stability, and ruminal degradability of Low dry matter Corn and Sorghum Silages. *J. Dairy Sci.* 86: 3575-3581
- GALLERT, C. und WINTER, J. (1998): Mikrobiologie anaerober Gärprozesse, In: *Technik anaerober Prozesse*, DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, Beiträge einer Veranstaltung des Sonderforschungsbereiches 238 der DFG in Zusammenarbeit mit dem DECHEMA-Forschungsausschuß Biotechnologie vom 7.-9. Oktober an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, H. Märkl und R. Stegmann (Hrsg.), S. 19 - 34
- GILLILAND, S. E., (1985): Role of Starter Culture Bacteria in Food Preservation. In: *Bacterial Starter Cultures for Foods*. Edited by Gilliland S. E., CRC Press, Inc Boca Raton, Florida.
- GROSS, F. und RIEBE, K., (1974): Gärfutter. Eugen Ulmer, Stuttgart
- GRÖBLINGHOFF, F.-F., LÜTKE ENTRUP, N., (2004): Erzeugung von Biomasse vom Grünland im Ackerbau. Vortrag im Rahmen der Biogastagung Haus Düsse, 25.02.2004
- GRAEF, S. P. und ANDREWS, J. F., (1974): Stability and control of anaerobic digestion. *Journal WPCF*, 36, S. 667 - 682

- GUJER, W. und ZEHNDER, A.J.B., (1983): Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technol.* 15: 127 - 167
- GROTENHUIS, J. T. C., SMIT, M., PLUGGE, C. M., YUANSHENG, X., LAMMEREN, A. A. M. v., STAMS, A. J. M. und ZEHNDER, A. J. B. (1991): Bacteriological Composition and Structure of Granular Sludge Adapted to Different Substrates. *Applied and Environmental Microbiology* 57, S. 1942 – 1949
- HAMMES, W.P., WEISS, N. und HOLZAPFEL, W., (1992): The Genera *Lactobacillus* and *Carnobacterium* in: Balows; A., H.G. Trüper, M. Dworkin, W. Harder u. K.H. Schleifer (Hrsg.): *The Prokaryotes*, Vol. II, Chapter 70, Springer Verlag, 1535 - 1595
- HANDLER, F., BLUMAUER, E., (2007): Ernte der Substrate, In AMON Th., HOPFNER-SIXT K., AMON B., BAUER D., (2007): Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen. Endbericht Projektnummer 810695/8539 erstellt am 28.01.2008
- HECHT, C., GRIEHL, C., (2006): Untersuchungen zur Inhibitionen bei der Vergärung proteinreicher Abfälle, in: B. Bilitewski, P. Werner, R. Stegmann, G. Rettenberger, M. Faulstich (Hrsg.): *Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Entwicklungen, Nutzen und Risiken der Biogastechnologie*, Tagungsband zur 5. Fachtagung 27./28.09.2006, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 46, Eigenverlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., Pirna, S. 109 - 121
- HELFERICH, D., OECHSNER, H., (2003): Hohenheimer Biogasertragstest. *Landtechnik* (58) 3/2003 S.148-149
- HENDERSON, A. R., McDONALD, D und WOLLFORD, M.K., (1972): Chemical changes and losses during the ensilage of wilted grass treated with formic acid. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 23, 1079-1087.
- HENDERSON, A. R.; McDONALD, O., (1975): The Effects of delayed sealing on fermentation and losses during ensilage. *J. Sci. Fd. Agric.*, 26, 653-667
- HERBES, C., (2009): Besondere Herausforderungen des Betriebes von Biogasanlagen in industrieller Dimension. In VDI Berichte 2057 S. 137 – 154 im Rahmen der Fachtagung Biogas 2009 Energieträger der Zukunft, Stuttgart 24-25.6.2009. VDI Verlag 2009
- HERRMANN, C., HEIERMANN, M., IDLER, C., SCHOLZ, V., (2008): Biogas Crops – Impact of Supply Chain and Feedstock Characteristics on Methane Yield. *AgEng 2008*, Griechenland
- HOEDTKE, S., (2007): Die Quantifizierung der Osmolalität in Futterpflanzen und ihre Veränderung in verschiedenen Stadien der Silierung. Dissertation Universität Rostock
- HOELKER, U. (2009): Nicht zu heiß vergären. *Biogas Journal* 12. Jahrgang, Nr. 2/09, S. 24 - 27
- HOLZER, M., MAYRHUBER, E., Danner H., Braun R., (2003): The role of *Lactobacillus buchneri* in forage preservation. *Trends in Biotechnology* Volume 21, Issue 6, Pages 282 - 287
- HONIG, H., (1969): Der Einfluss unterschiedlicher anaerober Lagerungsbedingungen auf den Gärverlauf. *Proc. 3rd. Gen. Meet. Europ. Grassland Fed.*, Braunschweig, 173-181
- HONIG, H. und PAHLOW, G., (1986): Wirkungsweisen und Einsatzgrenzen von Silage-Impfkulturen aus Milchsäurebakterien. *Das wirtschaftseigene Futter* 32, 205 – 228
- HONIG, H., (1986): Evaluation of aerobic stability. *Proceedings of the Eurobac Conference*, 12-16 August 1986, Uppsala Schweden
- HONIG, H., (1986): Determination of Aerobic Deterioration –System Völkenrode-. Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung, FAL Braunschweig, März 1985 Nr. S 2

- HONIG, H., (1991): Reducing losses during storage and unloading of silage. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 123, 1991: 116 - 128
- HONIG, H., (1999): Verluste durch Aerobe Stabilität Eine Zusammenfassung der Ergebnisse früherer Versuche zu diesem Thema
- HONIG, H., (2000): Reducing losses during storage and unloading of silage. Forage Conservation towards 2000, Sonderheft 123, Pahlow, G., Honig, H., (Hrsg.), „Landesbauforschung Völkenrode“ Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, S. 116-128
- HIGGINBOTHAM, G.E., MUELLER, S.C., BOLSEN, K.K. und DePETERS, E.J., (1998): Effects of Inoculants Containing Propionic Acid Bacteria on Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage. J. Dairy Sci. 81: 2185 - 2192
- HERTWIG, F. (2004): Siliermittel: Welche Mittel für welchen Zweck? Tagung Landtechnik für Profis, VDI-Berichte 1814
- IDLER, C., HERRMANN, C., HEIERMANN, M., (2007): Einfluss der Silierung auf die Methanausbeute von Energiepflanzen. VDLUFA Schriftenreihe 64.
- JAY, J.M. (1982) Antimicrobial properties of diacetyl. Appl. Environ. Microbiol., 44, 525 - 532
- JEROCH, H., DROCHNER, W., SIMON, O., (1999): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere Ulmer Verlag, Stuttgart
- JETTEN, M. S. M., STAMS, A. J. M. und ZEHNDER, J. B., (1992): Methanogenesis from acetate: a comparison of the acetate metabolism in *Methanothrix soehngenii* and *Methanosarcina* spp. FEMS Microbiology Letters, Volume 88, Issues 3-4, S. 181 - 197
- JONSSON, A. und PAHLOW, G., (1989): Systematic classification and biochemical characterization of yeasts growing in grass silage inoculated with *Lactobacillus* cultures. In: The role of yeasts and Clostridia in silage deterioration (A. Jonsson, ed) Swedish University of Agricultural Science. Report 42. Uppsala
- JONSSON, A. (1989): The role of yeasts and clostridia in silage deterioration. Swedish University of Agricultural Science. Report 42. Uppsala
- JUNG, U., PRÖTER J. (2008): Stabiler Prozess bei hohem Propionsäuregehalt. In: Biogas Journal 11. Jahrgang 2008 Nr. 2/08 S. 26 – 29
- JUNG, H.G., (2004): Impact of maturation on cell wall degradability in corn stem internodes, Journal of Animal Science Vol. 81, Suppl. 1, 2004
- JOSS, A., EDELMANN, W., (1999): Mikroaerobe Vorbehandlung biogener Abfälle, Forschungsprogramm Biomasse, Bundesamt für Energie, Schweiz, Bericht BFE Projekt EF REN 2020
- KANG, T. W., ADESOGAN, A. T., KIM, S. C., LEE, S. S., (2009): Effects of an esterase-producing inoculant on fermentation, aerobic stability, and neutral detergent fiber digestibility of corn silage. Journal of Dairy Science 92: 732 – 738
- KALZENDORF, Ch., (2007): Hefe und Pilzbesatz von wirtschaftseigenen Futtermitteln – Ergebnisse einer aktuellen Praxiserhebung in Niedersachsen. 52.Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau (AGGF) der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. in Zollikofen/CH. Postersektion II: Futterqualität /Neue Methoden
- KLOCKE, M., Knapik A., Mundt K., (2004): Den Bakterien auf der Spur, Landtechnik 6/2004

- KAHLSTATT, J. (1999): Feld- und Laborversuche zum Auftreten von Silageabwässern aus Flachsiloanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit. Dissertation TU München, 1999
- KAYHANIAN, M., (1994): Performance of a high-solids anaerobic digestion process under various ammonia concentrations. Environmental Technology, 20, S. 355 - 365
- KUNG, L., Jr., STOKES, M.R. (2002): Analyzing silages for fermentation end products. http://ag.udel.edu/departments/anfs/faculty/kung/articles/analyzing_silages_for_fermentati.htm
- KUNG, L., JR., SHEPERD A.C., SMAGALA, A. M., ENDRES K.M., BESSETT, C.A., RANJIT, N.K., GLANCEY, J.L., (1998): The Effect of Preservatives Based on Propionic Acid on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage and a Total Mixed Ration. Journal of Dairy Science 81: 1322-1330
- KLEINSCHMIT D.H., L. KUNG, Jr., (2006): The effect of Lactobacillus buchneri 40788 and Pediococcus pentosaceus R1094 on the fermentation of corn silage, Journal of Animal science Vol. 89 Suppl. 1, S. 3999-4004
- KLEINSCHMIT, D.H., SCHMIDT, R.J., L. KUNG, Jr., (2005): The effects of Various Antifungal additives on the fermentation and aerobic Stability of Corn Silage, Journal of Dairy Science 88, S.2130-2139
- KLEINSCHMIT, D. H., L. KUNG, Jr., (2006): The effects of Lactobacillus buchneri 40788 and Pediococcus pentosaceus R1094 on the fermentation of Corn Silage. J. Dairy Sci. 89: 3999-4004
- KLEINSCHMIT, D. H., L. KUNG, Jr. (2006): A Meta-Analysis of the Effects of Lactobacillus buchneri on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn and Grass and Small-Grain Silages. J. Dairy Sci. 89: 4005-4013
- KEYMER, U. und SCHLICHER, A., (1999): Überlegungen zur Errechnung theoretischer Gasausbeuten vergärbare Substrate in Biogasanlagen. Landtechnik-Bericht Nr. 32. Freising. 1999
- KUNST, S., (2005): Mikrobiologische Grundlagen in: W. Bischofsberger, N. Dichtl, K.-H. Rosenwinkel, C. F. Seyfried, B. Böhnke (Hrsg.): Anaerobtechnik, 2. vollständige überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- KTBL-Datensammlung, (2006): Energiepflanzen Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt 2006,
- KNABE, O., FECHNER, M. und WEISE, G., (1986): Verfahren der Silageproduktion. VEB Deutscher Landwirtschaftlicher Verlag, Berlin
- KAISER, F. L., (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation an der Technischen Universität München
- L. KUNG, Jr. und Ranjit, N.K., (2001): The Effect of Lactobacillus buchneri and Other Additives on the Fermentation and Aerobic Stability of Barley Silage. Journal of Dairy Science Vol. 84 No. 5, S.1149-1155
- KIM†, S.C., und ADESOGAN A. T., (2006): Influence of Ensiling Temperature, Simulated Rainfall, and Delayed Sealing on Fermentation Characteristics and Aerobic Stability of Corn Silage. J. Dairy Sci. 89:3122-3132

- KROONEMAN, J., FABER, F., ALDERKAMP, A. C., OUDE-ELFERINK, SJHW., DRIEHUS, F., CLEENWERCK, I., SWINGS, J. C., GOTTSCHAL, J. C., VANCANNEYT, M. (2002): *Lactobacillus diolivorans* sp. nov., a 1,2-propanediol-degrading bacterium isolated from aerobically stable maize silage. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, Vol 52, 639-646
- LANGHANS, G. (2009): Stickstoff in Biogasanlagen. Teil 2: Auswirkungen auf die Verfahrenstechnische Gestaltung und die Gasnutzung. Aus VDI-Berichte Nr. 2057, 173-184
- LATSCH, R., (2008): Wie kompakt muss die Silage sein? Literaturwerte und neueste Untersuchungen. Vortrag im Rahmen der Fachtagung Landtechnik, 27. Februar 2008 in Tänikon
- LETHOMÄKI, A. (2006): Biogas production from energy crops and crop residues, Dissertation (2006) 91, <http://dissertations.jyu.fi/studbiol/9513925595.pdf>, Stand Mai 2007
- ADLER, A., LEW, H. (1993): Untersuchungen zur mikrobiellen Qualität von Gras- und Maissilagen. Veröff. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein 20, 43 - 51
- LfL Tierernährung: Autorenkollektiv, (2008): Biertreber, Futterwert, Konservierung und erfolgreiche Einsatz beim Wiederkäuer. LfL Tierernährung und Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft Schriftenreihe
- LINDGREN, S., (2000): Hygienic problems in conserved forage, Forage Conservation towards, Sonderheft 123, Pahlow G., Honig H., (Hrsg.), „Landbauforschung Völkenrode“ Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, S. 117 – 190
- LINDGREN S., Pettersson K., Jonsson A., Lingvall P. und Kaspersson A., (1985): Silage Inoculation – Selected strains, temperature, wilting and practical application. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 15, pp. 9 – 18.
- LINDGREN, SE., DOBROGOSZ, WJ., Antagonistic activities of lactic acid bacteria in food and feed fermentations. *FEMS Microbiol Rev.* 1990; 87:149 - 164
- LINDGREN S., Lingval P. Kaspersson, A., KARTZOW, A., RYDBERG, E., (1983): Effect of inoculants, grain and formic acid on silage fermentation. *Swedish J. Agr. Res.* 13, 91 - 100
- LAHLALI, R., BAJJI, M., SERRHINI, M. N., JIJAKLI, M. H. (2008): Modelling the effect of temperature, water activity and solute on the in vitro growth of the biocontrol yeast *Pichia anomala* strain K. *Biotechno. Agron. Soc. Environ.* 12(4), 353-359
- LEURS, K., (2005): Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais, Dissertation Rheinisch Friedrich Wilhelms-Universität Bonn 2005
- LIN, C., Bolsen, K.K., Brent B.E., und. Fung, D.Y.C, (1992): Epiphytic lactic acid bacteria succession during the pre-ensiling periods of alfalfa and maize. *Journal of Applied Bacteriology*, 73, 375-387
- LINDORFER, H., (2007): Optimised Digestion of Energy Crops and Agricultural Residues in rural biogas plants. Dissertation University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna
- LAMBERT und STRATFORD (1999): Weak-acid preservatives: Modeling microbial inhibition and response. *Journal of applied Microbiology* 86: S.157 – 164, 1999
- LOSAND, B. (2003): Maissilagequalität in der Milchkuhhaltung – Neue Aspekte bei der Bewertung bei der Hochleistungsfütterung. *Mais* 31 (1), S. 16 – 18

- LOEWE, K. Ist die Integration einer Hydrolyse in das Konzept einer Biogasanlage ein sinnvoller Weg zur Anlagenoptimierung? Vortrag im Rahmen des Biogas Innovationskongress 2008 in Osnabrück, Veranstalter Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- MACKIE, RI, BRYANT MP, (1981): Appl. Environmental Microbiology 41:1363
- MacLEOD, F. A., GUIOT, S. R. und COSTERTON, J. W. (1990): Layered Structure of Bacterial Aggregates Produced in an Upflow Anaerobic Sludge Bed and Filter Reactor. Applied and Environmental Microbiology 56, S. 1598 - 1607
- MÄRKEL, H., FRIEDMANN, H., (2006): Biogasproduktion. In: Angewandte Mikrobiologie, Antranikian (Hrsg.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 459 - 487
- MAEHNERT, P., (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation an der Humboldt-Universität zu Berlin.
- MARTENS, S., (2006): An In-Vitro Study of aerobic Changes in Silages Effects of microbial activities and impact factors. Dissertation Universität Rostock
- MAYRHUBER, E., (2001): Homofermentative versus heterofermentative lactic acid bacteria An evaluation of their use as silage starters. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
- MERRY, R.J., Dhanoa, M.S., Theodorou, M.K., (1995): Use of freshly cultured lactic acid bacteria as silage inoculants Grass Forage Science 50 112-123
- Di MENNA, M.E., PARLE, J.N. und LANCASTER, R.J. (1981): The effects of some additives on the microflora of silage. J. Sci. Food Agric. 32: 1151-1156
- MOON, N. J., (1983): Inhibition of the growth of acid tolerant yeasts by acetate lactate and propionate and their synergistic mixture J. Appl. Bact. 55 (3) 453 – 460
- MILTNER und RATH, (1998): Nutzungsspezifische Reifezahlen. Zeitschrift Mais 4 140-143
- MIDDELHOVEN W. J., FRANZEN M. M., (1986): The yeast Flora of Ensiled Whole crop maize. Journal Sci. Food Agric., 37, 855-861
- MIDDELHOVEN W. J., van BAALEN A. H. M., (1988): Development of the yeast flora of whole-crop maize during ensiling and during subsequent aerobiosis. J. Sci. Food and Agriculture 42, 199 - 207
- McGECHAN, (1990): A review of losses arising during conservation of grass forage: Part 2 Storage losses, Journal of Agricultural Engineering Research, 45, 1-30
- McDONALD, P., A. R. HENDERSON and I. RALTON, (1973): Energy changes during ensilage. J.Sci.Food Agric, 24: S. 827- 834
<http://www3.interscience.wiley.com/journal/112608982/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>
- McDONALD P., HENDERSON A. R., HERON S. J. E., (1991): The Biochemistry of Silage. Second edition published by Chalcombe Publications, Aberystwyth, Great Britain.
- McGECHAN und WILLIAMS, (1994): A model of air infiltration losses during silage storage. Journal of Agricultural Engineering Rs. 57 S.237-249
- McLAUGHLIN, N. B., WILSON, D. B. und BOWDEN, D. M., (1978): Effect of a plastic cover on dry matter loss from a horizontal silo. Canadian Agricultural Engineering, Vol. 20, No. 1, 1 - 4
- MUCK, R.E. SPOELSTRA, S.F. und WIKSELAAR, P.G. (1992): Effects of Carbon Dioxide on Fermentation and aerobic stability of Maize Silage. J. Sci. Food Agric., 59, 405 - 412

- MUCK, R.E. and L. KUNG Jr. (1997): Effects of silage additives on ensiling. S. 187-199 in Silage: Field to Feedbunker. NRAES-99. NRAES, Ithaca, NY.
- MUCK, R.E., MOSER L.E., und PITT, R.E., (2003): Postharvest factors affecting ensiling. In: D. R. Buxton, R.E. Muck and J.H. Harrison (eds.) Silage science and technology No42. p.251-304. ASAS, CSAS, SSA, Madison, Wisconsin,
- MUCK, R.E., (1989): Initial bacterial numbers on lucerne prior to ensiling. Grass Forage Sci. 44:19
- MUCK, R.E., (1999): Influence of Air on the Preservation and aerobic spoilage of Silages. Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers Vol. 42(3):573-581
- MUKENGELE, M., OECHSNER, H., (2007): Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. Landtechnik 62 (1), 20 – 21
- MURPHY, M.G. und CONDON, S. (1984): Comparison of aerobic and anaerobic growth of *Latobacillus plantarum* in a glucose medium. Archives of Microbiology, 138, 49-53
- McGUFFEY und OWENS (1979): Effect of Covering and dry matter at ensiling on preservation of alfalfa in buker silos. J. Anim. Sci. 49:298-305
- McINERNEY, M. J., BRYANT, M. P. und PFENNIG, N. (1979): Anaerobic bacterium that degrades fatty acids in syntrophic association with methanogens. Arch. Microbiol. 41, 129 - 135
- NIKU-PAAVOLA M.-L., A. LAITILA, T. MATTILA-SANDHOLM, A. HAIKARA (1999): New types of antimicrobial compounds produced by *Lactobacillus plantarum*, Journal of Applied Microbiology 86, S. 29-35
- MÜLLER M., PRÖTER, J., (2009): Methoden der Desintegration – Stehen Aufwand und Nutzen im Verhältnis? . In VDI Berichte 2057 S. 71 – 80 VDI Verlag
- MILLS, J.A., J. KUNG, Jr., (2002): The effect of delayed Ensiling and Application of a Propionic Acid-Based Additive on the Fermentation of Barley Silage. Journal of Dairy Science 85, S.1969-1975
- NARENDRANATH, N. V., POWER, R., (2005): Relationship between pH and Medium Dissolved Solids in Terms of Growth and Metabolism of *Lactobacilli* and *Saccharomyces cerevisiae* during Ethanol Production. Applied and Environmental Microbiology, Mai 2005, S.2239 - 2243
- NELLES, M. (2003): Stand und Perspektiven der Kombination von mechanisch-biologischen und thermischen Verfahren zur Restabfallbehandlung in Deutschland. In: Umwelttechnik/Abfallwirtschaft-Workshop. Vereinigten Universität Hefei, VR China
- NEUREITER, M., (2004): Vor- und Nachteile von biologischen Silostarterkulturen. Biogasproduktion – alternative Biomassenutzung und Energiegewinnung in der Landwirtschaft 10. Alpenländisches Expertenforum, 18.-19. März 2004
- NUSSBAUM, H.-J., (2005): Stabilisierung von Total-Misch-Rationen durch Zusätze.
- NUSSBAUM, H.-J., (2008): Einfluss verschiedener Gärprodukte auf die Dynamik und Ausbeute an Biogas. Vortrag im Rahmen der DLG-Arbeitstagung
- NUSSBAUM, H.-J., (2009): Biogasanlagen: Geht's auch ohne Folie? in der Zeitschrift Top Agrar 9/2009 S. 80 - 82
- NISHINO, N., YOSHIDA, M., SHIOTA, H. und SAKAGUCHI, E., (2002): Accumulation of 1,2-Propanediol and enhancement of aerobic stability in whole crop maize silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*. Journal of Applied Microbiology 2003, 94, 800 - 807

- NISHINO, N., WANG, C., LI, Y., PARVIN S. und KANN, K., (2009): Occurrence and survival in whole crop corn silage of *Acetobacter pasteurianus*. 15th. International Silage Conference, Conference Proceedings S. 165-166, Madison 2009
- ODENING, M. und FILLER, G., (2007): Effizienz und Rentabilität von Biogasanlagen. Papier zur Präsentation auf der 47. Jahrestagung der GEWISOLA in Freising/Weihenstephan, September 26-28, 2007
- OECHSNER, H. und LEMMER, A., (2009): Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten? VDI Berichte Nr. 2057, S. 37 - 46
- OTTOW (1997): Umweltbiotechnologie. Springer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm
- OUDE-ELFERINK, S., LUPPENS, S. B. I., MARCELIS, C. M. und STAMS, A. J. M. (1998): Kinetics of Acetate Oxidation by Two Sulfate Reducers Isolated from Anaerobic Granular Sludge. Applied and Environmental Microbiology, Juni 1998, p. 2301 - 2303
- OUDE-ELFERINK, S., Driehus, J.W.H., F., GOTTSCHAL J. C., SPOELSTRA, S. F., (1999): Silage fermentation and their manipulation. FAO. Silage making in the tropics with particular emphasis on smallholders. Proceedings of the FAO Electronic Conference on Tropical Silage. ISSN: 92-5-104500-3
- OUDE-ELFERINK, S., KROONEMAN, J.; GOTTSCHAL, J:C., SPOELSTRA S. F., FABER, F., DRIEHUS F., (2001): Anaerobic Conversion of Lactic Acid to Acetic Acid and 1,2-Propanediol by *Lactobacillus buchneri*. Applied and Environmental Microbiology, p. 125-132
- OHLY, N., (2006): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Optimierung der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2006
- OHYAMA, Y., SASAKI, S., und HARA S., (1975): Factors influencing aerobic deterioration of silages and changes in chemical composition after opening silos. J. Sci. Food Agric. 26:1137
- OELBERG, T. J., CLARK, A.K., McGUFFEY, R.K.und SCHINGOETHE, D.J., (1983): Evaluation of covering, dry matter, and preservation at ensiling of alfalfa in buker silos. J. Dairy Sci. 66:1057-1068.
- O'KIELY, P., PADRAIG and MUCK, R. E., (1992): Aerobic Deterioration of Lucerne (*Medicago sativa*) and Maize (*Zea mais*) Silages – Effect of Yeasts. Journal Sci. Food Agric., 59, 139-144
- O'KIELY P., (1989): Deterioration of silage at feeding time. Farm and Food Research, 20 (2), p.4-5
- PARSONS, D.J. (1991): Modelling gas flow in a silage clamp after opening. Journal of Agricultural Engineering Res. 50: S.209-218
- PAHLOW, G., (1985): O₂-abhängige Veränderungen der Mikroflora in Silagen mit Lactobacterienzusatz. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 41 (Kongreßband 1984), 630-639
- PAHLOW,G. und HONIG, H., (1986): Wirkungsweise und Einsatzgrenzen von Silage-Impfkulturen aus Milchsäurebakterien 1. Mitteilung. Das wirtschaftseigenen Futter 32, S. 20 - 35
- PAHLOW,G. und MÜLLER (1995): Einfluss des Ernteverfahrens auf die Nachweisbarkeit ephiphytischer Laktobakterien von Futterpflanzen. Das Wirtschaftseigene Futter 41, 306-326

- PAHLOW, G. (2004): Erfahrungen mit Mikroorganismen in der Silierung. In 20. Hülseberger Gespräche, H.W. Schaumann-Stiftung
- PAHLOW, G., (2005): Alle Macht den Kleinsten? Vortrag „Sächsischer Futterbautag“ der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Nossen, 13. April 2005
- PALMOWSKI, L., (2000): Zerkleinerungs- und Abbauverhalten organischer Materialien. Dissertation Technische Universität Braunschweig
- PELHATE (1977): Maize Silage: Incidence of moulds during ensiles. *Rev. Mycol.* 39(2):65 - 95
- PIPYN, P. und VERSTRAETE, W., (1981): Lactate and ethanol as intermediates in two-phase anaerobic digestion, *Biotechnology and Bioengineering* 23, 1145 - 1154
- PIPER, P., ORTIZ CALDERON, C., HATZIXANTHIS, K., MOLLAPOUR, M., (2001): Weak acid adaption: the stress that confers yeasts with resistance to organic acid food preservatives. *Microbiology* (2001), 147: 2635-2642
- PLÖCHL, M., ZACHARIAS, H., HERRMANN, C., HEIERMANN, M., und PROCHNOW, A., (2009): Influence of Silage Additives on Methane yield and Economic Performance of Selected Feedstock. *Agricultural engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript 1123. Vol. XI.
- PLÖCHL, M., HEIERMANN, M., LINKE, B., Schelle, H., (2009): Biogas Crops – Part II: Balance of Greenhouse Gas Emissions and Energy from Using Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript number 1086. Vol XI
- POBEHEIM, H., (2010): Einfluss von Spurenelementen auf den anaeroben Abbau von Maissilage und einem Modells substrat. Dissertation an der TU Graz
- REES (1997): The Development of a Novel Antifungal Silage Inoculant, Doctoral Research Thesis. Cranfield University Biotechnology Centre, Cranfield, Great Britain
- REISS, J., (1986): Schimmelpilze – Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokio
- RUXTON, I., CLARK, B.I. und McDONALD, P., (1957): A review of the effects of oxygen on ensilage. *J. Br. Grassl. Soc.* 30:23
- RUSER, B., (1989): Erfassung und Identifizierung des epiphytischen Milchsäurebakterienbesatzes auf Gras und Mais in Abhängigkeit von Standort, Sorte, Entwicklungsstadium sowie Ernte- und Klimaeinflüsse. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 103
- RUSSELL, JB., (1992): Another explanation for the toxicity of fermentation acids at low pH: Anion accumulation versus uncoupling. *Journal of applied bacteriology* Vol. 73 no. 5: 363-370
- ROGER J. MERRY, DAVIES, D. R., (1999): Propionibacteria and their role in the biological control of aerobic spoilage in silage, *Lait* 79 S. 149 – 164
- RANJIT N. K., TAYLOR, C. C. und L. KUNG Jr. (2002): Effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage. *Grass and Forage Science* 57, 1 - 6
- RICHTER, W., (2008): Untersuchungen zu Verlusten an Trockenmasse in Siloanlagen mit unterschiedlicher Abdeckung bei Biogasanlagen. Tagungsbeitrag zum 120. VDLUFA-Kongress in Jena 16.-19. September 2008
- RICHTER, W., ZIMMERMANN, N., SPIEKERS, H., OSTERTAG, J. und BAUER, J., (2009): Controlling am Maissilo. *Zeitschrift Mais* 1/2009, 36, 26-29

- ROSS, F., MAACK, C. und BÜSCHER, W., (2008): Einfluss von Trockenmasse-Gehalt, Lagerungsdichte und Häcksellänge auf das Porenvolumen im Siliergut. *Landtechnik* 63, 344-345
- ROITSCH, J., (2009): Verfahrensbewertung von NaWaRo-Biogasanlagen. 24. Wissenschaftliche Fachtagung "Biogaserzeugung in Nordrhein-Westfalen – Rahmenbedingungen, Fortschritte und Perspektiven"
- ROOKE, J. A. and HATFIELD, R.D. (2003): Biochemistry of Ensiling. In: „Silage Science and Technology“ (eds. D.R. Buxton, R.R. Muck and J.H. Harrison), Agronomy Series no. 42, American Society of Agronomy Madison, WI, USA, pages 95-139
- ROUEL, M. und WYSS, U., (1994): Aerobe Stabilität von Silagen in *Agrarforschung* 1 (9): 393-396
- RUEFFER, H., BOECK, J., (1986): Reinigung von Papierabwässern mit anaeroben Verfahren. *Zeitung für Wasser- und Abwasser-Forschung* 19, 29 - 32
- SANDERSON, M.A., (1993): Aerobic stability and in vitro digestibility of microbially inoculated corn and sorghum silages. *Journal of Animal Science* Vol. 71, Issue 2: 505-514
- SANTEN, H. (2007): Die Perkolation zur Vorbehandlung von Abfällen vor der Vergärung – Einflussgrößen und Leistungsdaten sowie Konsequenzen für die großtechnische Umsetzung. Dissertation an der Universität Braunschweig.
- SAHM, H., (1981): Biologie der Methanbildung. *Chemie Ingenieur Technik* 53, 854 - 863
- SEYFRIED, Bode, Austermann-Haun, Coenen, Demel, Kroiss, Pascik, Strotmann, Svoldal, Temper, Weiland, Winter, (1994): Geschwindigkeitsbestimmende Schritte beim anaeroben Abbau von organischen Verbindungen in Abwässern, 3. Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 7.5 „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“ in *Korrespondenz Abwasser*, 41. Jahrgang 1/94, S. 101 – 107
- SCHMIDT, L., WEISSBACH, F., WERNECKE, K. D., HEIN, E., (1971): Erarbeitung von Parametern für die Vorhersage und Steuerung des Gärverlaufs bei der Grünfuttersilierung. Bericht des OSKAR-Kellner-Institutes, Rostock
- SCHMIDT, R.J. und L. KUNG Jr., (2010): The effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 with or without homolactic bacterium on the fermentation and aerobic stability of corn silage made at different locations. *Journal of Dairy Science* 93(4): 1616-1624
- SCHERER P., (1995): Vergärung. In: Thomé-Kozmiansky, K.J: *Biologische Abfallbehandlung*. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1995
- SCHERER, P., (2008): Effizienzüberwachung und Bestimmung der Abbauraten von Biogasanlagen über die Bilanzierung der Kohlenstofffracht. In: Tagungsband zum 17. Jahrestreffen des Fachverbandes Biogas e.V. pp. 137-146, Eigenverlag Fachverband Biogas, Freising
- SCHLEGEL, H. G., (2007): *Allgemeine Mikrobiologie*. Herausgegeben von Georg Fuchs. 8. Auflage Georg Thieme Verlag Stuttgart New York
- SCHMERBAUCH, K.-J., (2000): Gärqualität und Schimmelpilzwachstum in Silagen in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und äußerem Luftabschluß. Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin.
- SCHMIDT, R. J., HU, W., MILLS, J. A. and L. KUNG Jr.(2009): The Development of lactic acid bacteria and *Lactobacillus buchneri* and their effects on the fermentation of alfalfa silage. *J. Dairy Sci.* 92: 5005 – 5010
- SCHUMACHER, B. (2008): Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation, Universität Hohenheim
- SMITH, P. H., MAH, R. A., (1996): Kinetics of Acetate Metabolism during Sludge Digestion. *Appl. Environ. Microbiol.* 1996 14(3), 368-371
- SPIES, P. (1986): Anaerobe Behandlung fetthaltigen Abwassers am Beispiel einer Wollwäscherei, Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 65.
- SIEGRIST, H. D. VOGEL, D. WILD, (1995): Erzeugung von organischen Substraten durch Frischschlammversäuerung auf Abwasserbehandlungsanlagen 43. Darmstädter Seminar

- Abwassertechnik, Stickstoffelimination mit oder externe Substrate?, Schriftenreihe WAR 85, Technische Hochschule Darmstadt, S. 107 – 124
- SPIEKERS, H.; R. MILTNER; W. BEEKER (2003): Nacherwärmung gefährdet besten Silomais. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen Lippe 33, S.18-19
- STEINHOEFEL, O. WEBER, U. (2004): Mit Thermobildern Nacherwärmung auf der Spur. DLZ, Heft 3 S. 108-112
- STROEM, K., (2005): Fungal Inhibitory Lactic Acid Bacteria Characterization and Application of *Lactobacillus plantarum* MiLAB 393. Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala
- SPECKMANN, C.A., R.M. PHILIPS, D.P. LINNERTZ, J.C.A. BERGER, L.A. CARVER, and R.B. PARKER, (1981): A survey for indigenous *Lactobacillus* species on standing field corn ensiling maturity. J. Animal Science 53 (Suppl 1):99.(Abstr.)
- SPOELSTRA, S. F., COURTIN, M.G. und van BEERS, J.A.C., (1988): Acetic acid bacteria can initiate aerobic deterioration of whole crop maize silage. J. Agr. Sci. Camb., 111: 127 - 132
- STAUDACHER, W., PAHLOW, G., HONIG, H., (1999): Certification of silage additives in Germany by DLG. Proceedings 12th International Silage Conference, Uppsala, SLU, 239 - 241
- STEINHOEFEL, (2004): Entwicklung und Situation von Risikofaktoren der aeroben Stabilität in der sächsischen Silageerzeugung. Sächsischer Futtertag 2004, 14.4.2004
- TABACCO E., PIANO S., CAVALLARIN L., BERNARDES T.F., BORREANI G., (2009): Clostridia spore formation during aerobic deterioration of maize and sorghum silages as influenced by *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* inoculants. Journal of Applied Microbiology ISSN 1364-5072
- TADDIGS, T., (2000): Untersuchung der Versäuerung und des Einsatzes von Hydrozyklonen in Anaerobanlagen; Dissertation am Lehrstuhl für Technologie der Kohlenhydrate der Technischen Universität Braunschweig
- THYLIN, I., SCHUISKY, P., LINDGREN, S., GOTTSCHAL, J.C., (1995): Influence of pH and d-lactic acid concentration on *Clostridium tyrobutyricum* during continuous growth in a pH-autostat. Journal of Applied Bacteriol. 79: S. 663-670
- THIELE, J. H., WU, W.-M., JAIN, M. K. und ZEIKUS, J. G. (1990): Ecoengineering High Rate Anaerobic Digestion Systems: Analysis of Improved Syntrophic Biomethanation Catalysts. Biotechnology and Bioengineering 35, 990 - 999
- THÖNI, (1988): Lebensgrundlagen von Mikroorganismen
- THAYSEN, J. (2003): Wer bezahlt der bestimmt, Lohnunternehmen, 9/2003, S. 16-20
- THAYSEN, J., RUSER, B., KLEINMANN, J. (2006): Dichte Controlling – Bedeutung und Instrumente. In: Gesellschaft für Kunststoffe im Landbau e.V. [Hrsg.]: Siliererfolg auch bei großen Erntemassen. GKL Frühjahrstagung 2006, 28/29.03.2006, Universität Bonn, Institut für Landtechnik Sektion Bau und Technik, Bonn, S. 14-17
- THAYSEN, J. (2007): Qualitätsanforderungen an Silagen für Biogasanlagen. Fortbildungsseminar LK-SH Nr. 786. Futterkamp, 28.6.2007
- THAYSEN, J. (2007): Siliermittel: Rechtliche Rahmenbedingungen, Wirksamkeit DLG-Geprüfter Produkte und Einsatzempfehlungen. Übersichten der Tierernährung 35 (2007) 55-91
- THAYSEN, J. (2009): Alles was Recht ist Rechtliche Risiken bei der Silierung von Saftfutter. Vortrag bei Sächsischer Futterbau Tag 2009 in Nossen 2009
- THIMANN, Kenneth, V., (1955): The Life of Bacteria, The Macmillan Company, New York
- TABACCO, E., S. PIANO, L. CAVALLARIN, T.F. BERNARDES, und BORREANI, G., (2009): Clostridia spore formation during aerobic deterioration of maize and sorghum silages as influenced by *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* inoculants. Journal of Applied Microbiology ISSN 1364-5072
- VALDEZ, F. R., HARRISON, J. H., DEETZ, D. A., und FRANSEN, S. C., (1988): In vivo Digestibility of Corn and Sunflower Intercropped as a Silage Crop. Journal of Dairy Science Vol. 71, No. 7.

- VISSERS, M. M. M., DRIEHUS, F., Te GIFFEL, M.C., De JONG, P., LANKVELD, J.M.G., (2007): Concentrations of Butyric Acid Bacteria Spores in Silage and Relationships with Aerobic Deterioration. *Journal of Dairy Science* 90: S.928-936 2007
- VTI Thüringer Verfahrenstechnisches Institut für Umwelt und Energie e.V., (2004): Bericht Nr. 064.2/02 Grundlagenuntersuchungen zu Art und Umfang der Substrataufbereitung für Gärversuche und Biogasproduktion Kurztitel: Substrataufbereitung.
- VDLUFA-Methodenbuch, NAUMANN, C., BASSLER, R., SEIBOLD, R. und BARTH, C. (2006): Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Methodenbuch Band I – III, Dritte Auflage, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- VOGTHERR, J., OECHSNER, H., LEMMER, A., JUNGBLUTH, T., (2007): Restgaspotentiale NaWaRo-beschickter Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Fortschritte beim Biogas - Biogasproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse und organischen Reststoffen 18. – 21. September, Tagungsband S. 71- 75
- WARD, R. T., (2005): Opportunities and Limitations in the use of NDF fibre digestibility values. Penn State Dairy Cattle Nutrition Workshop
- WIERINGA, G.W., (1961): The influence of green forages on fermentation, Futterkonservierung 7, 27-35
- WILKINSON, J.M. STARK, B.A., (1992): Silage in Western Europaa survey of 17 countries.
- WALKER, GM. (1998): Yeast physiology and biotechnology. WILEY-VCH Verlag GmbH
- WEINBERG, Z. G., ASHBELL, G., HEN, Y., und AZRIELI, A., (1993): The effect of applying lactic acid bacteria on the aerobic stability of silages. *Journal of Bacteriology*, 75: S.512-518
- WEINBERG, Z. G., Ashbell, G., Bolsen, K. K., Pahlow, G., HEN, Y., AZRIELI, A., (1995): The effect of a propionic acid bacterial inoculant applied at ensiling, with or without lactic acid bacteria, on the aerobic stability of pearl millet and maize silages. *Journal of Applied Bacteriology*, 78 430-436
- WEINBERG, Z. G., MUCK, R.E., (1996): New Trends and oppertunities in the development and use of inoculants for silage. *FEMS Microbiology Reviews* Volume 19 Issue 1, 53 - 68
- WEINBERG, Z. G., ASHBELL, G., HEN, Y., AZRIELI, A., SZAKACS, G., und Filya, I., (2002): Ensiling whole-crop wheat and corn in large containers with *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri*. *Journal Ind. Micro Biotechnology* 28: S.7-11
- WEISE, G., HERTWIG, F., (2009): Anforderungen an die Siliertechnik zur Ausschaltung verlustbringender Prozesse durch Luftsauerstoff bei der Welksilagebereitung. <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2335/siliertk.pdf> Stand: 31.10.2009
- WYSS, U., (1993): Einsatz eines Milchsäurebakterien-Impfzusatzes aus Sicht der Konservierung. *Landwirtschaftl Schweiz* 6 (4), 203-207
- WYSS, U., (1996): Gär-saftverluste bei Maissilagen möglichst vermeiden. *Agrarforschung* 2 (9): 393-396
- WYSS, U., (1995): Gär-saftanfall der Silage vom TS-Gehalt abhängig *Agrarforschung* 2 (9): 393-396
- WEISSBACH, F., SCHMIDT, L. und HEIN, E., (1974): Method for anticipation of the run of fermentation silage making, based on the chemical composition of green fodder. *Proceedings of the XIIth International Grassland Congress, Moskau*, 663 - 673
- WEISSBACH, F. und Peters, G., (1974): Sickersaftbildung bei der Grünfuttersilierung in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren. *Forschungsbericht: Akademie der Landbauwissenschaften in der DDR (AdL), Dummerstorf-Rostock*, S.15ff
- WEISSBACH, F., (1968): Beziehung zwischen Ausgangsmaterial und Gärungsverlauf bei der Grünfuttersilierung, *Habilitationsschrift. Universität Rostock*, 1968
- WEISSBACH, F., und S. Kuhla (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfütter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur, *Übers. Tierernährg.* 23 (1995) S. 189-214

- WEISSBACH, F. und HONIG, H., (1996): Über die Vorhersage und Steuerung des Gärungsverlaufes bei der Silierung von Grünfütter aus extensivem Anbau. Landbauforschung Völknerode. 1996, S.46, 10-17
- WEISSBACH, F., (1998): Über die Bestimmung der Gärverluste in Silierversuchen unter Laborbedingungen, VDLUFA Schriftenreihe 49, 110. VDLUFA-Kongr. , S.461 - 464
- WEISSBACH, F., (2005): A simple method for the correction of fermentation losses measured in laboratory silos, Silage production and utilisation, Proc. XIV Silage Conference, Belfast, S.278
- WEISSBACH, F., (2005): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. KTBL, 13. Auflage
- WEISSBACH, F., STRUBELT, C., (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik (63) 2/2008 S.82 - 83
- WEISSBACH, F., (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Landtechnik 2008
- WEISSBACH, F., (2009): Untersuchungen über den Ausnutzungsgrad des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen bei der Biogasgewinnung. Landtechnik 2009, im Druck
- WESTERMANN, P. , AHRING, B. K. und MAH, R. A. (1989): Threshold acetate concentrations for acetate catabolism by acetoclastic methanogenic bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 55, 514 - 515
- WOOLFORD, M. K., (1975): Microbiological screening of the straight chain fatty acids (C1-C12) as potential silage additives. J. Sci. Food Agric. 26: S. 219 - 228
- WOOLFORD, M. K., (1976): A preliminary Investigation into the Role of Yeasts in the Ensiling process. Journal of Applied Bacteriology, 1976 41, 29-36
- WOOLFORD, M. K., HONIG, H., FENLON, J.S., (1977): Teil 1: Untersuchungen über aerobe Umsetzungen in Silage mit Hilfe einer Labortechnik. Das Wirtschaftseigene Futter, Band 23 Heft 1 1977 Seite 10 – 22
- WOOLFORD, M. K., HONIG, H., FENLON, J.S., (1978): Teil 2: Mikrobiologische, physikalische und chemische Veränderungen während des aeroben Abbaus von Maissilage. Das Wirtschaftseigene Futter, Band 24 Heft 2 Seite 125 - 139
- WOOLFORD, M. K., (1978): The aerobic deterioration of silage Agricultural Research Council Research Review 4 8-12
- WOOLFORD, M. K., Honig, H., FENLON, J.S., (1978): Teil 3: Untersuchungen über den aeroben Abbau in Silage mit einer Labormethode. Das Wirtschaftseigene Futter, Band 25 Heft 2/3 Seite 158 - 177
- WOOLFORD, M. K., (1984): The Silage Fermentation. Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- WOOLFORD, M. K., (1990): A review The detrimental effects of air on silage. Journal of Applied Bacteriology, 68, 101 - 116
- WU, W.-M., JAIN, M. K. M., MACARIO, E. C. d., THIELE, J. H. und ZEIKUS, J. G. (1992): Microbial composition and characterization of prevalent methanogens and acetogens isolated from syntrophic methanogenic granules. Applied Microbiology and Biotechnology 38, 282 - 290
- WILHELM, H., (1991): Futterkonservierung / Silagebereitung, Heuwerbung, Getreide-Maistrocknung. Leopold Stocker Verlag, Graz/Stuttgart
- RUSSELL, J., WILSON, B., David. B., (1996): Why are Ruminant Cellulolytic Bacteria Unable to Digest Cellulose at Low pH. Journal of Dairy Science, 79: 1503-1509
- ZEHNDER, A. J. B. und BROCK, T. D. (1980): Anaerobic Methane Oxidation: Occurrence and Ecology. Applied and Environmental Microbiology 39, 194 - 204
- ZELLNER, G., NEUDOERFER, F., DIEKMANN, H. (1994): Degradation of lactate by an anaerobic mixed culture in a fluidized-bed reactor, Water Research 28, 1337 - 1340
- ZHENNAI, Y., (2000): Antimicrobial Compounds and extracellular Polysaccharides produced by Lactic acid bacteria: Structures and Properties Dissertation Helsinki

- ZIMMER, E, (1967): Nährstoffverluste bei der Vergärung von Futterpflanzen. Das Wirtschaftseigene Futter. 13:271 – 286
- ZIMMER, E., (1993): Gärbiologie bei Gras- und Maissilagen. BAL-Bericht über die „Österreichweite Silagetagung“ am 13. und 14. Januar 1993, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft in Wien (Hrsg.), Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning, S. 13 - 20

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Anaerober Abbauweg von Milchsäure zu Essigsäure und 1,2-Propandiol durch <i>L. buchneri</i> (OUDE-ELFERINK et al., 1999).....	20
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Temperaturverlaufes unter Luftsauerstoffeinfluss im HONIG-Test	27
Abbildung 3:	Zusammenhang zwischen Hefekeimbesatz und aerober Stabilität der Maissilage nach KUNG (1998)	28
Abbildung 4	Auswirkungen von Lufteinfluss während der Lagerung auf die Hefeentwicklung in Silagen; Quelle Pahlow 1985.....	29
Abbildung 5	Darstellung des vierstufigen Biogasprozesses (GUJER & ZEHNDER 1983)	35
Abbildung 6	Abbaubarkeit von organischen Stoffen nach OTTOW (1997).....	37
Abbildung 7:	Kohlenstofffluss unter anaeroben Umweltbedingungen mit aktiver Methanogenese	41
Abbildung 8	Acetoklastische Methanbildung der Gattungen <i>Methanosarcina</i> und <i>Methanothrix</i> (verändert nach EGGEN & VOS, 1992)	42
Abbildung 9	Verfahrenskonzepte und Betriebsweisen von Biogasanlagen	43
Abbildung 10	Lagerung	55
Abbildung 11	Abmessungen der Thermo-.....	55
Abbildung 12	Bilanzweg der Silierversuche mit den berücksichtigten Verlustarten; Verluste in Fettdruck bei Bilanzierung berücksichtigt, Verluste in Normaldruck zur Kontrolle	56
Abbildung 13	Versuchsaufbau der Bilanzierungsversuche	57
Abbildung 14	Bilanzzeitpunkte in Abhängigkeit des Temperaturverlaufs.....	59
Abbildung 15	Zufütterungsöffnungen und Probenahmehahn am 60 Liter Batch-Fermenter, 2 Liter SCHOTT®-Flasche mit 3-Port Anschlusssystem	60
Abbildung 16	Abhängigkeit der Gärverlust-Differenz vom Ausgangstrockenmassegehalts	63
Abbildung 17	Trockenmasseverluste der unbehandelten Kontrollen in Abhängigkeit des Trockenmassegehaltes im Erntematerial	64
Abbildung 18	Entwicklung der Gesamtmilchsäurebakterien bei SV 4.....	65
Abbildung 19	Entwicklung des Essigsäuregehaltes und der Hefenpopulation bei SV 4	65
Abbildung 20	Entwicklung der Gesamtmilchsäurebakterienpopulation bei SV 5	66
Abbildung 21	Entwicklung des Essigsäuregehaltes und der Hefenpopulation bei SV 5	66
Abbildung 22:	Silierversuch 1: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test.....	72
Abbildung 23:	Silierversuch 2: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test.....	72
Abbildung 24:	Silierversuch 3: Temperaturverlauf im HONIG-Test.....	73
Abbildung 25:	Silierversuch 4: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test.....	73
Abbildung 26	Silierversuch 5: Temperaturverlauf und Gärsäureverlauf im HONIG-Test.....	74
Abbildung 27:	Verlauf der Hauptsäuren Milchsäure und Essigsäure unter Luftsauerstoff-Einfluss bei unbehandelter Silagen	76
Abbildung 28:	Verlauf der Hauptsäuren Milchsäure und Essigsäure unter Luftsauerstoff-Einfluss bei Behandlung der Silagen mit einem heterofermentativen Siliermittel	76
Abbildung 29:	Gärsäureverlauf behandelte Silage Silierversuch 1 unter Luftexposition.....	77

Abbildung 30: Gärsäureverlauf behandelte Silage Silierversuch 2 unter Luftexposition	77
Abbildung 31: Gärsäureverlauf der behandelten Silage Silierversuch 4 unter Luftexposition.....	78
Abbildung 32: Gärsäureverlauf der behandelten Silage Silierversuch 5 unter Luftexposition.....	78
Abbildung 33: Säureverlauf bei Zugabe von Essigsäure	85
Abbildung 34: Säureverlauf bei Zugabe von Milchsäure	85
Abbildung 35: Biogasproduktion bei Batch-Vergärung von Glucose, Essigsäure und Milchsäure	86
Abbildung 36: Mittlere Zusammensetzung der Säureverteilung im Fed-Batch-Ansatz über 14 Tage mit verschiedenen Kohlenstoffquellen.....	87
Abbildung 37: Temperaturverlauf im Honig Test: Silage Sorghum I	11
Abbildung 38: Temperaturverlauf im Honig Test: Silage Sorghum II	11

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Gegenüberstellung installierter elektrischer Leistung und Großvieheinheiten, eigene Berechnungen.....	1
Tabelle 2:	Vergärbarkeitskennzahlen verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999).....	6
Tabelle 3	Einflussfaktoren auf Silage-Mikroorganismen und Gärprozesse aus (ADLER, 2002) in Anlehnung an (WOOLFORD, 1984) und (McDONALD et al., 1991).....	7
Tabelle 4	Fermentationsprodukte sowie Trockenmass- und Energieausbeuten der Hauptgärungsvorgänge von Silagemikroorganismen (nach ROOKE & HATFIELD, 2003)	8
Tabelle 5	Übersicht von Verlustarten und Verlusthöhen bei der Silierung nach ZIMMER (1967).....	9
Tabelle 6	Wirkungsrichtungen der von der DLG geprüften Siliermittel DLG (2000)	15
Tabelle 7	Systematik der Siliermitteltypen nach Wirkungsrichtung und Wirkprinzip.....	16
Tabelle 8	Eindringtiefe der Luft an der Anschnittfläche von Silagen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte nach LOSAND (2003)	23
Tabelle 9	Unterschiede in der Verdichtung im Silo (n=20 Silos) nach Thaysen et al. (2006)	24
Tabelle 10	Temperaturbereiche der Biozönose (KUNST 2005).....	36
Tabelle 11	Substrate und Abbauprodukte der Hydrolyse.....	36
Tabelle 12	Bewertung der Merkmale von Fettsäuren nach SPIES (1986).....	37
Tabelle 13	Theoretische Gasausbeuten ausgewählter Gärprodukte der Silierung (eigene Berechnungen)	39
Tabelle 14:	Gegenüberstellung von Methanoxymicrobium soehngenii und Methanosarcina sp. (nach Ten BRUMMELER et al. (1985), ZEHNDER et al. 1980)).....	42
Tabelle 15:	Gasausbeuten nach Baserga (1998).....	46
Tabelle 16	Zusammenfassung der ermittelten Parameter	51
Tabelle 17:	Charakterisierung der HPLC-Analytik.....	53
Tabelle 18:	Methodik der Weender Analytik.....	54
Tabelle 19	Versuchsdesign der Zufütterungsversuche	60
Tabelle 20	Eingesetzte Kohlenstoffquellen und Mengen	60
Tabelle 21	Kenngößen des Ausgangsmaterials (Silomais)	62
Tabelle 22	Mikrobiologische Untersuchungen des Ausgangsmaterials.....	62
Tabelle 23	Die Silierverluste der heterofermentativen Silage (Beh.) liegen geringfügig über der unbehandelten Kontrolle (Kon.).....	63
Tabelle 24	Trockenmassegehalt und Gärgasverluste der Laborsilagen:	63
Tabelle 25	Mikrobieller Status der Silagen nach Ende der Silierung (Tag 90).....	64
Tabelle 26	Einfluss des Siliermitteleinsatzes auf den Besatz an Hefen.....	64
Tabelle 27	Trockenmasse nach WEISSBACH (2008) korrigiert, Inhaltsstoffe, Gasausbeuten und FoTS der Laborsilagen (1,5L & 30L) unterschiedlicher Erntejahre (2007/2008) und Standorte	67
Tabelle 28	Kenngößen der Gärqualität (Gärsäuren, Alkohole, und Verluste in % der TM _k ; aerobe Stabilität in Stunden)	68

Tabelle 29	Hefenbesatz am Öffnungstag 90 und die aerobe Stabilität der Kontrollsilagen sowie TM-Verluste der Praxissilagen	69
Tabelle 30	Temperaturverlauf bei Raumtemperatur 20°C: signifikante Verbesserung der aeroben Stabilität (+3°C gegenüber Umgebungstemperatur) und über den Zeitraum geringere Erwärmung bei den behandelten Silagen	70
Tabelle 31	Bilanzzeitpunkte während der aeroben Stabilität. Angaben in Stunden.....	71
Tabelle 32	Gehalt an Säuren und Alkoholen zu den Bilanzzeitpunkten II und IIIa	75
Tabelle 33	Silierversuch 1-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	79
Tabelle 34	Silierversuch 2-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	79
Tabelle 35	Silierversuch 3-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	79
Tabelle 36	Silierversuch 4-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	80
Tabelle 37	Sorghum I-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	80
Tabelle 38	Sorghum II-Kontrolle: Veränderungen der Rohrnährstoffzusammensetzung während aeroben Einfluss	80
Tabelle 39	Berechnung der Frischmassemengen vor aerober Lagerung für eine Batch-Einwaage von 300g	82
Tabelle 40	Gegenüberstellung der Methanausbeuten, Trockenmasseverlusten nach HONIG und den Methanverlusten	83
Tabelle 41	Berechnung der Methanverluste aus Dauer der aeroben Exposition.....	84
Tabelle 42:	Abbaugrade bei semikontinuierlicher Zugabe	86
Tabelle 43	Verbliebener Rest der Faserfraktionen zu den Bilanzzeitpunkten IIIb und IIIc.....	97
Tabelle 44	Steigende Rohfasergehalte und sinkende Methanausbeuten (rechnerische Bestimmung nach WEISSBACH (2008) bei konstantem TM-Gehalt)	98
Tabelle 45	Gegenüberstellung ermittelten Gaserträge zum Bilanzzeitpunkt II der Kontrollsilagen und der nach WEISSBACH (2008) berechneten Gaserträge	99
Tabelle 46	Ermittelte Methanverluste und theoretische Methanverluste durch Säureabbau.....	100
Tabelle 47	Silierverluste Bilanzvergleich: SV 1 ohne Grünfutterkorrektur.....	I
Tabelle 48	Silierverluste Bilanzvergleich SV 2 ohne Grünfutterkorrektur.....	I
Tabelle 49	Bilanzvergleich Silierverluste: SV 4 ohne Grünfutterkorrektur.....	II
Tabelle 50	Bilanzvergleich Silierverluste: SV 3 ohne Grünfutterkorrektur.....	II
Tabelle 51	Silierverluste Bilanzvergleich: SV 1 mit Grünfutterkorrektur.....	III
Tabelle 52	Silierverluste Bilanzvergleich SV 2 mit Grünfutterkorrektur	III
Tabelle 53	Bilanzvergleich Silierverluste: SV 4 mit Grünfutterkorrektur.....	IV
Tabelle 54	Bilanzvergleich Silierverluste: SV 3 mit Grünfutterkorrektur.....	IV
Tabelle 55	Vergleich der gemessenen Trockenmassegehalte in der Silage ausgedrückt in TM_k mit den TM nach der Silierbilanz ohne Grünfutterkorrektur berechneten	V

Tabelle 56	Kenngroßen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)	V
Tabelle 57	Kenngroßen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)	VI
Tabelle 58	Kenngroßen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)	VII
Tabelle 59	Kenngroßen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)	VIII
Tabelle 60	Kenngroßen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)	IX
Tabelle 61	Kenngroßen weitergehender Silagen	X
Tabelle 62	SV 1 – Kontrolle: Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste	XII
Tabelle 63	SV 1 he/ho: Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste	XII
Tabelle 64	SV 2 Kontrolle:	XIII
Tabelle 65	SV 2 he/ho:	XIII
Tabelle 66	SV 3 Kontrolle:	XIV
Tabelle 67	SV 3 he/ho:	XIV
Tabelle 68	SV 4 Kontrolle:	XV
Tabelle 69	SV 4 he/ho:	XVI
Tabelle 70	SV 1: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff	XVI
Tabelle 71	SV 2 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff	XVI
Tabelle 72	SV 3 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff	XVII
Tabelle 73	SV 4 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff	XVII

10 Anhang

Tabelle 47 Silierverluste Bilanzvergleich: SV 1 ohne Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Verluste	Ernte	nach Silierung
	<u>1,23 % FM</u>			<u>1,86 % FM</u>	
303,7 g FM	→	300 g FM	305,69 g FM	→	300 g FM
77,93 g TM	→	72,24 g TM	78,44 g TM	→	70,75 g TM
↓	<u>7,3 % TM</u>	↓	↓	<u>9,8 % TM</u>	↓
<u>25,66 % TM</u>		24,1 % TM	<u>25,66 % TM</u>		23,58 % TM
	Gemessen:	<u>23,8 % TM</u>		Gemessen:	<u>22,6 % TM</u>
	Gemessen:	<u>25,6 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>25,3 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 48 Silierverluste Bilanzvergleich SV 2 ohne Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Verluste	Ernte	nach Silierung
	1,26 % FM			<u>1,3 % FM</u>	
303,83 g FM	→	300 g FM	303,95g FM	→	300 g FM
107,19 g TM	→	100,76 g TM	107,23g TM	→	100,47g TM
↓	6,0 % TM	↓	↓	<u>6,3 % TM</u>	↓
<u>35,28 % TM</u>		33,59 % TM	<u>35,28 % TM</u>		33,49 % TM
	Gemessen:	<u>33,8 % TM</u>		Gemessen:	<u>30,8 % TM</u>
	Gemessen:	<u>35,3 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>33,8 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 49 Bilanzvergleich Silierverluste: SV 4 ohne Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Verluste	Ernte	nach Silierung
	<u>1,1 % FM</u>			<u>1,4 % FM</u>	
303,34 g FM	→	300 g FM	304,26 g FM	→	300 g FM
94,64 g TM	→	88,87 g TM	94,93 g TM	→	88,47 g TM
↓	<u>6,1 % TM</u>	↓	↓	<u>6,8 % TM</u>	↓
<u>31,2 % TM</u>		29,62 % TM	<u>31,2 % TM</u>		29,49 % TM
	Gemessen:	<u>26,1 % TM</u>		Gemessen:	<u>25,3 % TM</u>
	Gemessen:	<u>27,5 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>28,6 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 50 Bilanzvergleich Silierverluste: SV 3 ohne Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	Nach Silierung	Ernte	Verluste	Nach Silierung
	<u>0,4 % FM</u>			<u>0,9 % FM</u>	
301,2 g FM	→	300 g FM	302,72 g FM	→	300 g FM
90,06 g TM	→	86,64 g TM	90,51 g TM	→	85,44 g TM
↓	<u>3,8 % TM</u>	↓	↓	<u>5,6 % TM</u>	↓
<u>29,9 % TM</u>		28,88 % TM	<u>29,9 % TM</u>		28,48 % TM
	Gemessen:	<u>29,59 % TM</u>		Gemessen:	<u>27,69 % TM</u>
	Gemessen:	<u>30,2 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>31,4 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 51 Silierverluste Bilanzvergleich: SV 1 mit Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Verluste	Ernte	nach Silierung
	<u>1,23 % FM</u>			<u>1,86 % FM</u>	
303,7 g FM	→	300 g FM	305,69 g FM	→	300 g FM
85,49 g TM	→	79,25 g TM	86,04 g TM	→	77,6 g TM
↓	<u>7,3 % TM</u>	↓	↓	<u>9,8 % TM</u>	↓
<u>28,15 % TM</u>		26,42 % TM	<u>28,15 % TM</u>		25,87 % TM
	Gemessen:	<u>23,8 % TM</u>		Gemessen:	<u>22,6 % TM</u>
	Gemessen:	<u>25,6 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>25,3 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 52 Silierverluste Bilanzvergleich SV 2 mit Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Verluste	Ernte	nach Silierung
	1,26 % FM			<u>1,3 % FM</u>	
303,83 g FM	→	300 g FM	303,95g FM	→	300 g FM
112,69 g TM	→	105,93 g TM	114,73g TM	→	105,63 g TM
↓	6,0 % TM	↓	↓	<u>6,3 % TM</u>	↓
<u>37,09 % TM</u>		35,31 % TM	<u>37,09% TM</u>		35,21 % TM
	Gemessen:	<u>33,8 % TM</u>		Gemessen:	<u>30,8 % TM</u>
	Gemessen:	<u>35,3 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>33,8 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 53 Bilanzvergleich Silierverluste: SV 4 mit Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	nach Silierung	Ernte	Verluste	nach Silierung
	<u>1,1 % FM</u>			<u>1,4 % FM</u>	
303,34 g FM	→	300 g FM	304,26 g FM	→	300 g FM
100,85 g TM	→	94,7 g TM	101,15 g TM	→	94,28 g TM
↓	<u>6,1 % TM</u>	↓	↓	<u>6,8 % TM</u>	↓
<u>33,25 % TM</u>		31,57 % TM	<u>33,25 % TM</u>		31,43 % TM
	Gemessen:	<u>26,1 % TM</u>		Gemessen:	<u>25,3 % TM</u>
	Gemessen:	<u>27,5 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>28,6 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 54 Bilanzvergleich Silierverluste: SV 3 mit Grünfutterkorrektur

Kontrolle			Behandlung		
Ernte	Verluste	Nach Silierung	Ernte	Verluste	Nach Silierung
	<u>0,4 % FM</u>			<u>0,9 % FM</u>	
301,2 g FM	→	300 g FM	302,72 g FM	→	300 g FM
96,49 g TM	→	92,82 g TM	96,98 g TM	→	91,55 g TM
↓	<u>3,8 % TM</u>	↓	↓	<u>5,6 % TM</u>	↓
<u>32,03 % TM</u>		30,94 % TM	<u>32,03 % TM</u>		30,52 % TM
	Gemessen:	<u>29,59 % TM</u>		Gemessen:	<u>27,69 % TM</u>
	Gemessen:	<u>30,2 % TM_k</u>		Gemessen:	<u>31,4 % TM_k</u>

Unterstriche markieren gemessenen Werte

Tabelle 55 Vergleich der gemessenen Trockenmassegehalte in der Silage ausgedrückt in TM_k mit den TM nach der Silierbilanz ohne Grünfütterkorrektur berechneten

	SV 1		SV 2		SV 3		SV 4	
	Kont.	Beh.	Kont.	Beh.	Kont.	Beh.	Kont.	Beh.
Bilanz	26,42	25,87	35,31	35,21	30,94	30,52	31,57	31,43
Gemes	25,6	25,3	35,3	33,8	30,2	31,4	27,5	28,6
diff	103,2%	102,3	100	104,2	102,5	97,2	114,8	109,9

Tabelle 56 Kenngrößen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)

Maismaterial	Silierversuch 1							
Behandlung	Kon ⁴⁾				he/ho ⁵⁾			
Entnahme aus ASTA h Kenngröße	0	92 Tag 4	142 Tag 6	288 Tag 12	0	92 Tag 4	142 Tag 6	288 Tag 12
pH	3,6	4,24	7,58	7,61	4,2	4,03	6,63	7,59
Milchsäure % TM_k	7,2	2,7	< 0,02.	< 0,02	1,1	0,3	< 0,02	< 0,02
Essigsäure % TM_k	3,9	1,3	< 0,02.	< 0,02	6,6	8,6	0,1	< 0,02
Buttersäure % TM_k			< 0,02	< 0,02.	n.n	n.n	< 0,02	< 0,02
Propionsäure % TM_k	0,3	1,1	< 0,02	< 0,02.	0,8	2,6	1,4	< 0,02.
1,2-Propandiol % TM_k	0,2	0,1	< 0,02	< 0,02	n.n.	n.n.	< 0,02	< 0,02.
Ethanol % TM_k	1,6	0,1	< 0,02	< 0,02	2,2	n.n.	< 0,02	< 0,02
Gewichtsverluste % FM	-	1,74	2,85	7,39	-	0,3	2,54	4,75
Honig-Verluste % TM	-	3,6	11,9	26	-	0,8	12,8	20,3
Gasbildung $CH_4 L_N$ / kg TM_k (Batch-Versuch)	319	n.b.	279	185	313	n.b.	289	203
%	100 %	-	87,5% -12,3%	58,0 % -42 %	100 %	-	92,2 % -7,8 %	64,8 -35,2

**Tabelle 57 Kenngrößen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität
(Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)**

Maismaterial	Silierversuch 2							
Behandlung	Kon ⁴⁾				he/ho ⁵⁾			
Entnahme aus ASTA h Kenngröße	0	52 2 Tage	90 4 Tage	160 7 Tage	0	52 2 Tage	90 4 Tage	160 7 Tage
pH	3,9	7,46	7,57	7,12	4,22	4,4	4,13	8,34
Milchsäure % TM _K	5,8	0,4	0,4 ±0,1	0,2	0,0	0,8	0,3	0,4
Essigsäure % TM _K	3,5	0,2	0,3 ± 0,1	0	8,6	7,2	8,9	< 0,02
Buttersäure % TM _K	n.n.	< 0,02	< 0,02	0	0,0	0,0	0,0	< 0,02
Propionsäure % TM _K	n.n.	0,3	< 0,02	0	0,2	0,1	0,2	< 0,02
1,2-Propandiol % TM _K	n.n.	< 0,02	0,1 ± 0,0	0	0,2	0,1	0,2	< 0,02
Ethanol % TM _K	0,6	< 0,02.	0,1 ± 0,0	0	0,4	0,3	0,0	< 0,02
Gewichtsverluste % FM	-	4,2	3,7	6,1	-	0,8	1,2	3,7
Honig-Verluste % TM	-		6,1	13,3 ± 2	-		0,2	3,4
Gasbildung CH ₄ L _N / kg TM _K (Batch-Versuch)	335 ± 12	n.b.	311 ± 0,2	272 ± 28,5	334 ± 14	n.b.	329 ± 20	341 ± 49
%	100	-	93 % - 7 %	81 % - 19%	100		98 % - 2 %	98 % + 2%

**Tabelle 58 Kenngrößen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität
(Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)**

Maismaterial	Silierversuch 3			
Behandlung	Kon ⁴⁾		he/ho ⁵⁾	
Entnahme aus ASTA h Kenngröße	0	280 (12 Tage)	0	280 (12 Tage)
pH	3,8	8,0	4,2	4,3
Milchsäure % TM _K	6,4	< 0,02.	1,5	1,4
Essigsäure % TM _K	2,6	< 0,02	5,7	5,7
Buttersäure % TM _K	n.n.	< 0,02	n.n.	n.n.
Propionsäure % TM _K	n.n.	< 0,02	n.n.	n.n.
1,2-Propandiol % TM _K	1,6	< 0,02.	3,3	2,9
Ethanol % TM _K	0,3	< 0,02	0,9	0,6
Gewichtsverluste % FM	-	4,6	-	1,6
Honig-Verluste % TM	-	6,1	-	0,0
Gasbildung CH ₄ L _N / kg TM _K (Batch-Versuch)	320	284	344	291
%	100	11,3	100	15,4

Tabelle 59 Kenngrößen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität (Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)

Maismaterial	Silierversuch 4							
Behandlung	Kon ⁴⁾				he/ho ⁵⁾			
Entnahme aus ASTA h Kenngröße	0	48 2 Tage	96 4 Tage	198 8 Tage	0	48 2 Tage	96 4 Tage	198 8 Tage
pH	4,0	4,3	5,19	7,35	4,16	4,20	4,23	4,23
Milchsäure % TM _K	4,9	2,8	0,9	1,1	2,0	0,7	0,1	0,1
Essigsäure % TM _K	3,0	2,2	1,3	0,6	6,7	7,2	7,9	7,8
Buttersäure % TM _K	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	n.n.
Propionsäure % TM _K	0,1	n.n.	0,3	0,1	0,1	n.n.	0,1	n.n.
1,2-Propandiol % TM _K	0,2	0,3	0,2	n.n.	3,9	3,4	3,4	3,5
Ethanol % TM _K	1,8	0,0	n.n.	n.n.	1,0	n.n.	0,9	0,9
Gewichtsverluste % FM	-		1,8	6,1	-		0,6	1,4
Honig-Verluste % TM	-		6,8	23,3	-		2,8	5,8
Gasbildung CH ₄ L _N / kg TM _K (Batch-Versuch)	301 ± 22,1		273 ± 19,5	214 ± 5,5	304± 22,8		300± 17,9	294± 26
%	100 %		90,9 % (-9,1 %)	71,4 % (-28,6 %)	100 %		98,6 % (-1,4 %)	96,8 % (-3,2 %)

**Tabelle 60 Kenngrößen der Gärqualität über den zeitlichen Verlauf der aeroben Stabilität
(Gärsäuren, Gewichtsverluste, Honig-Verluste)**

Maismaterial	Silierversuch 5							
Behandlung	Kon⁴⁾				he/ho⁵⁾			
Entnahme aus ASTA h Kenngröße	0		100 Std. Tag 4	258 Std. Tag 11	0		100 Std. Tag 4	258 Std. Tag 11
pH	3,72	k.E.	7,11	5,35	4,08	k.E.	4,09	4,16
Milchsäure % TM _K	6,0	k.E.	n.n.	n.n.	0,91	k.E.	0,6	0,54
Essigsäure % TM _K	1,41	k.E.	n.n.	n.n.	7,52	k.E.	8,41	7,29
Buttersäure % TM _K	n.n.	k.E.	n.n.	n.n.	n.n.	k.E.	n.n.	n.n.
Propionsäure % TM _K	n.n.	k.E.	n.n.	n.n.	n.n.	k.E.	n.n.	n.n.
1,2-Propandiol % TM _K	0,3	k.E.	n.n.	n.n.	3,44	k.E.	3,42	3,13
Ethanol % TM _K	1,94	k.E.	0,05	n.n.	0,93	k.E.	0,91	0,71
Gewichtsverluste % FM	-	k.E.	3,28	8,22	-	k.E.	0,47	1,3
Honig-Verluste % TM	-	k.E.	13,7	37,9		k.E.	0,0	0,2
Gasbildung CH ₄ L _N / kg TM _K (Batch- Versuch)	303,9	k.E.	256	178	319,4	k.E.	299,8	299,2
%	100	k.E.	84,1% -15,9	58,5 % -41,5 %	100	k.E.	93,9 % -6,1 %	93,7 -6,3

Tabelle 61 Kenngrößen weitergehender Silagen

	Praxissilagen					Sorghum	
	1	2	3	4	5-	I	II
TM_{Korr.} % FM	31,2	36,7	51,8	35,5	35,7	20,1	23,2
Gärverluste % TM	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,98	1,26
Asche %	3,4	2,8	3,0	3,1	3,3	6,8	5,8
pH [-]	3,92	3,69	4,35	3,82	3,78	3,7	3,7
Milchsäure % TM_K	4,09	6,30	1,54	7,2	6,97	10,3	9,8
Essigsäure % TM_K	5,47	1,53	2,4	2,10	3,11	2,8	3,4
Buttersäure % TM_K	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	< 0,02
Propionsäure % TM_K	< 0,02	< 0,02	0,03	0,13	0,07	< 0,02	< 0,02
1,2- Propandiol % TM_K	< 0,02	< 0,02	1,88	0,94	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Ethanol % TM_K	1,86	0,38	0,59	0,59	0,64	2,9	1,3
Dauer aerobe Exposition [Tage]	7	7	7	7	7	12	12
Honig- Verluste [% TM]	3,8	11,4	0,5	4,1	11,9	20,6	19,3
FM-Verluste [%]	1,2	4,2	0,2	1,5	4,3	7,8	6,1
Hefen KbE / g FM	1,00E+02	1,90E+033	1,00E+02	1,00E+02	2,79E+07	n.b.	n.b.
Schimmel KbE / g FM	< 100	1,8E+03	1,00E+02	< 100	< 100	n.b.	n.b.

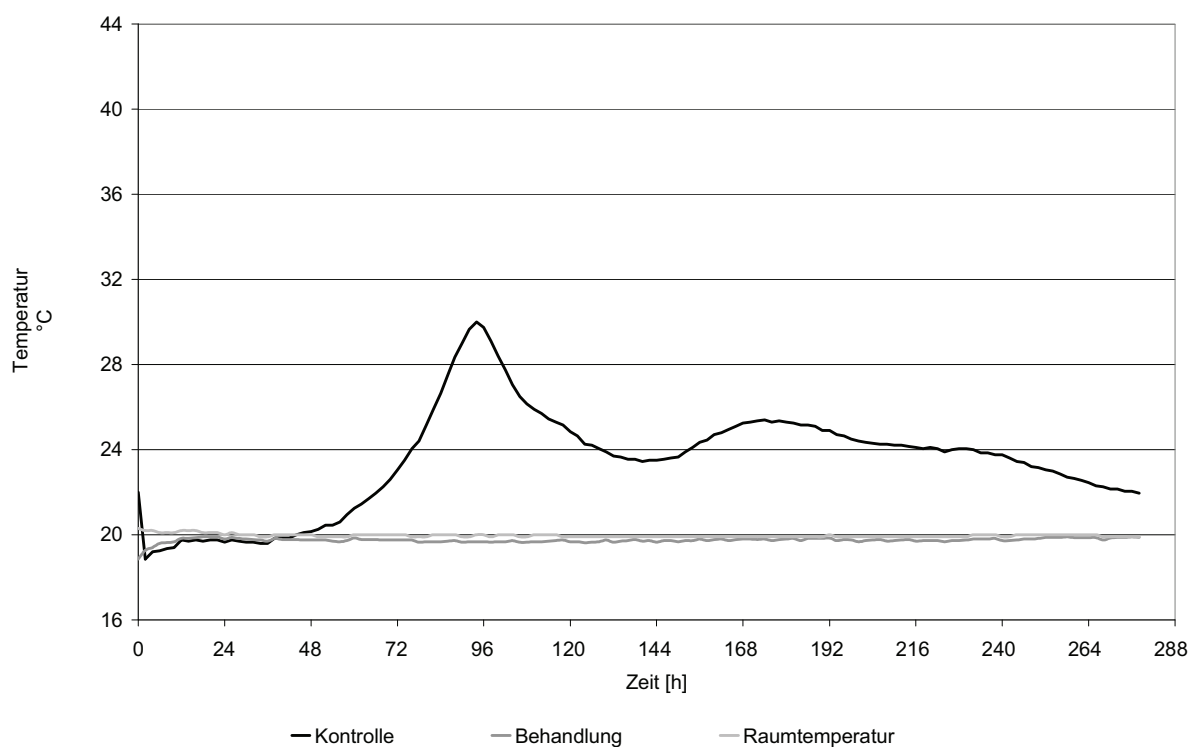
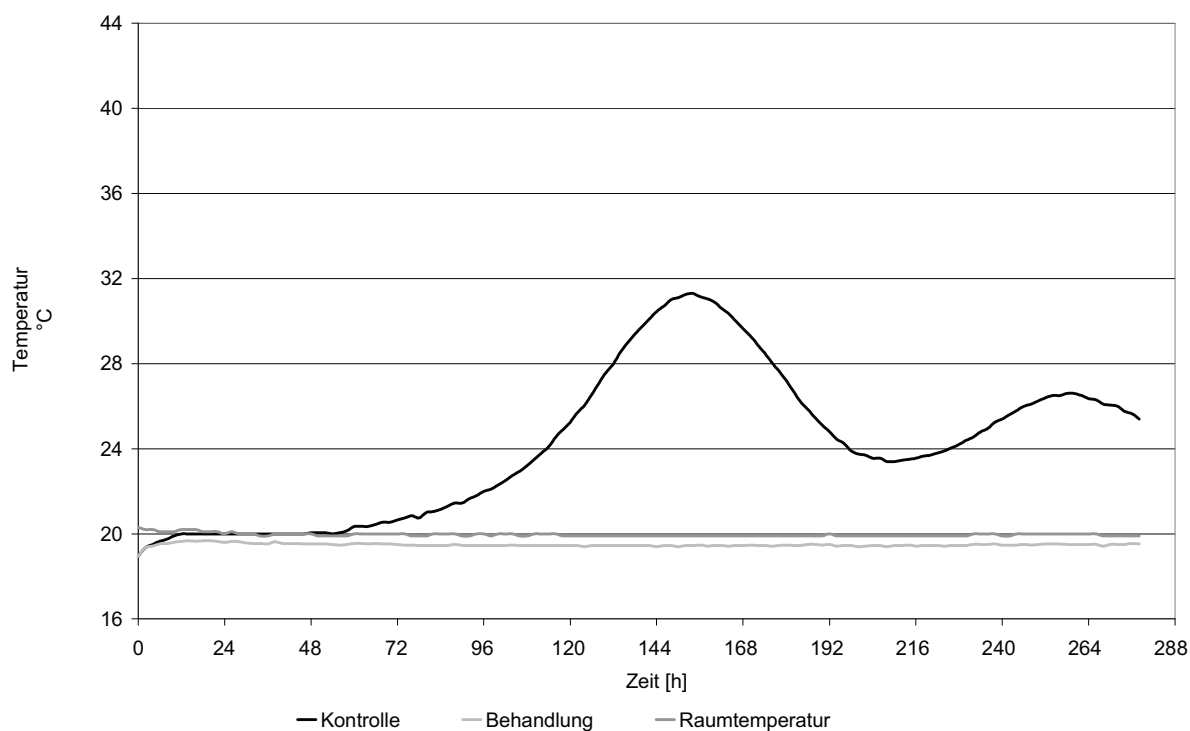
**Abbildung 37 Temperaturverlauf im Honig Test: Silage Sorghum I****Abbildung 38 Temperaturverlauf im Honig Test: Silage Sorghum II**

Tabelle 64 SV 2 Kontrolle:

Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	286			
			TM	TM _k	
TM-Gehalt	%		33,8	35,3	
Trockenmasse	gr.		96,67	101,0	
Feuchte	gr.		189,3	185,0	
Zeitpunkt I		HONIG TMV	berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		3,8	93,0	282,3	103,1%
%-TM _k		3,6	97,3	282,4	103,1%
Gew.-Verl.	%	4,2	273,99	273,9	100%
Zeitpunkt II					
%-TM		6,5	90,7	279,7	101,6%
%-TM _k		6,1	94,8	279,8	101,6%
Gew.-Verl.	%	3,7		275,4	100%
Zeitpunkt III					
%-TM		14,1	83,0	272,3	101,4%
%-TM _k		13,3	87,7	272,8	101,6%
Gew.-Verl.	%	6,1		268,6	100%

Tabelle 65 SV 2 he/ho:

Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	286			
			TM	TM _k	
TM-Gehalt	%		30,8	33,8	
Trockenmasse	gr.		88,1	96,7	
Feuchte	gr.		197,91	189,3	
Zeitpunkt I		HONIG TMV	Berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		0,0	88,1	286,0	100,8%
%-TM _k		0,0	96,7	286,0	100,8%
Gew.-Verl.	%	0,8		283,6	100 %
Zeitpunkt II					
%-TM		0,2	87,9	285,8	101,1%
%-TM _k		0,2	96,5	285,8	101,1%
Gew.-Verl.	%	1,2		282,6	100%
Zeitpunkt III					
%-TM		3,9	84,7	282,6	102,6%
%-TM _k		3,4	93,4	282,7	102,7%
Gew.-Verl.	%	3,7		275,4	100%

Tabelle 66 SV 3 Kontrolle:

Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	333			
			TM		TM _k
TM-Gehalt	%		29,6		31,2
Trockenmasse	gr.		98,6		103,9
Feuchte	gr.		234,4		229,1
Zeitpunkt I		HONIG TMV	berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		6,1	92,6	327,0	103%
%-TM _k		5,6	98,1	327,2	103%
Gew.-Verl.	%	4,6		317,8	100%

Tabelle 67 SV 3 he/ho:

Bilanzvergleich HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	333			
			TM		TM _k
TM-Gehalt	%		27,7		30,4
Trockenmasse	gr.		92,2		101,2
Feuchte	gr.		240,8		231,8
Zeitpunkt I		HONIG TMV	berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		0,0	92,2	333	102%
%-TM _k		0,0	101,2	333	102%
Gew.-Verl.	%	1,6		327,7	100%

Tabelle 68 SV 4 Kontrolle:

Bilanzierung HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	400			
			TM	TM _k	
TM _k	%		26,1	27,5	
Trockenmasse	gr.		104,4	110	
Feuchte	gr.		295,6	290	
Zeitpunkt I		HONIG TMV	berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
%-TM _k		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Gew.-Verl.	%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Zeitpunkt IIIb					
%-TM		6,9	96,8	392,4	99,9%
%-TM _k		6,9	102,6	392,4	99,9%
Gew.-Verl.	%	1,8		381,8	97,2%
Zeitpunkt IIIc					
%-TM		23,3	80,07	375,7	100,0%
%-TM _k		23,3	84,5	374,3	99,7%
Gew.-Verl.	%	6,1		375,6	100%

Tabelle 69 SV 4 he/ho:

Bilanzierung HONIG und Gewichtsverluste

Einwaage	gr	400			
			TM	TM _k	
TM _k	%		25,3	28,6	
Trockenmasse	gr.		101,2	114,4	
Feuchte	gr.		298,8	285,6	
Zeitpunkt I		HONIG TMV	berechneter TM-Rest	Gesamtgewicht (TM-Rest + H ₂ O)	
%-TM		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
%-TM _k		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Gew.-Verl.	%	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Zeitpunkt IIIb					
%-TM		2,9	97,9	396,7	99,7 %
%-TM _k		2,9	111	396,6	99,7 %
Gew.-Verl.	%	0,55		397,8	100 %
Zeitpunkt IIIc					
%-TM		6,7	93,5	392,3	99,5 %
%-TM _k		6,7	106,6	392,2	99,5 %
Gew.-Verl.	%	1,43		394,3	100 %

Tabelle 70 SV 1: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff

Bilanzzeitpunkt / Parameter	II	IIIb	IIIc
TM	23,8	24,3	20,3
TM _k	25,6	24,3	20,3
Asche % TM _k	3,1	3,9	4,7
Rohfaser % TM _k	25,5	27,5	33,2
ADF % TM _k	28,5	30,5	33,6
NDF % TM _k	51,5	46,4	54,3
Stärke % TM _k	23,8	28	31,8

Tabelle 71 SV 2 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff

Bilanzzeitpunkt / Parameter	II	IIIb	IIIc
TM	33,8	31,07	28,6
TM _k	35,3	32,3	28,6
Asche % TM _k	3,6	4,36	4,74
Rohfaser % TM _k	19,8	22,34	22,11
ADF % TM _k	20,7		24,2
NDF % TM _k	40,3		43,43
Stärke % TM _k	33,5	31,28	27,63

Tabelle 72 SV 3 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff

Bilanzzeitpunkt / Parameter	II	IIIb	IIIc
TM	29,6	k.E.	29,16
TM _k	31,2	k.E.	29,16
Asche % TM _k	3,5	k.E.	4,42
Rohfaser % TM _k	21,5	k.E.	21,58
ADF % TM _k	24,6	k.E.	25,95
NDF % TM _k	45,3	k.E.	48,38
Stärke % TM _k	27,1	k.E.	34,11

k.E.= keine Entnahme;

Tabelle 73 SV 4 – Kontrolle: Gehalte der Silageinhaltsstoffe und ihre prozentuale Veränderung über die zeitliche Exposition an Luftsauerstoff

Bilanzzeitpunkt / Parameter	II	IIIb	IIIc
TM	26,1	25,1	21,5
TM _k	27,5	25,5	21,7
Asche % TM _k	4,41	4,9	5,95
Rohfaser % TM _k	18,83	21,38	25,96
ADF % TM _k	21,29	24,56	29,56
NDF % TM _k	41,73	49,62	51,77
Stärke % TM _k	28,67	29,43	21,01

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, nur die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt und die den verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wahlstedt, im April 2010